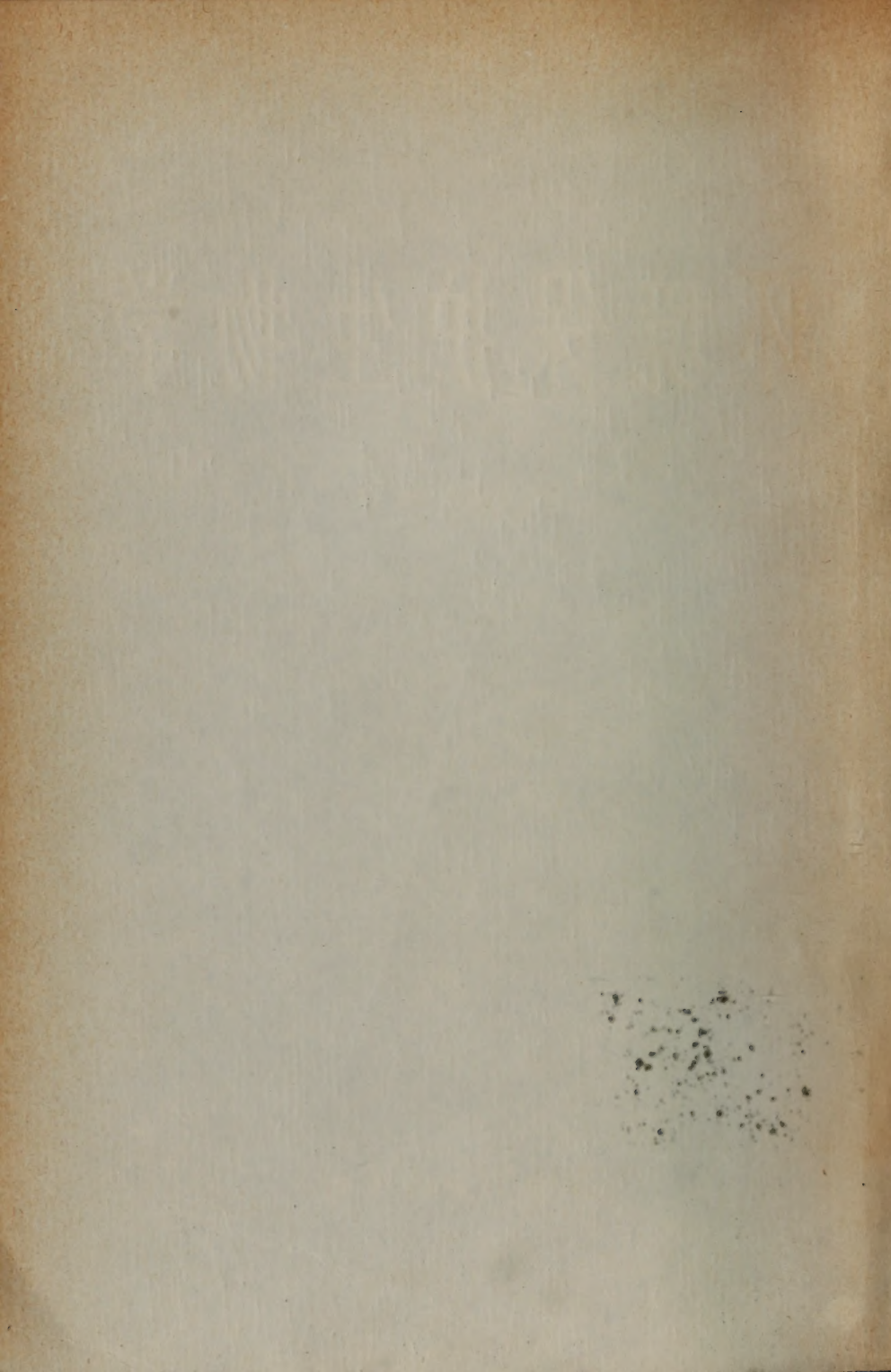


环境保护生物学

张志杰 编著



冶金工业出版社



58.137
588

环境保护生物学

张志杰 编著



冶金工业出版社

中科院植物所图书馆



S0017471

内 容 提 要

书中系统地阐述了环境生物学的基本理论、应用和研究方法，并介绍这一领域的最新研究成果和发展趋势。全书共分四篇：第一篇介绍了生态学的基本概念和环境污染的生态作用；第二、三篇全面地阐述了生物在环境污染防治中的基本作用、净化原理和实际应用；最后一篇比较系统地介绍了环境生物学的基本研究方法。

本书主要供从事环境保护，污水处理的科技人员以及工科院校环境保护专业及有关院校生物系师生参考。

环 境 保 护 生 物 学

张志杰 编著

*

冶金工业出版社出版

(北京灯市口74号)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

*

850×1168 1/32 印张 9 1/4 字数 242千字

1982年9月第一版 1982年9月第一次印刷

印数 00,001~7,100册

统一书号：15062·3890 定价1.15元

目 录

前言

第一篇 环境污染的生态学问题	1
第一章 环境污染的生态学原理	1
一、环境与环境污染	1
二、种群和群落	7
三、生态系统	14
四、生态系统中的能量与物质循环	20
五、自然界的主要生态类群和系统	25
六、系统分析在环境污染生态学中的应用研究	29
第二章 环境污染的生态作用	31
一、大气污染的生物反应	31
二、大气影响植物受害的因素	38
三、水体污染对生物的影响	43
四、土壤污染对生物的影响	47
五、环境污染对生态系统的影响	50
六、环境污染对人体健康的影响	57
第二篇 环境污染治理的生物学问题	61
第一章 微生物与环境保护	61
一、微生物的生物学特性	61
二、废水生物处理的基本方法和对水质的要求	70
三、废水处理微生物学	77
四、污泥消化微生物学	89
五、细菌在废水处理中的作用	96
六、废水生化处理方面几个值得探讨的问题	100
第二章 微型生物与环境保护	106
一、原生动物的类群和特征	106
二、轮虫及其他微型动物的特征	110
三、废水处理中微型动物生态特点	113
四、微型生物的作用与指示生物的应用	123
五、藻类植物与废水处理	127

第三章 植物与环境保护	131
一、植物对空气的净化作用	131
二、植物对有害气体的抗性和吸收能力	137
三、植物对污水和土壤污染物质的吸收和积累	139
四、城市、工矿区防污绿化问题	146
第四章 环境质量的生物学评价与监测	150
一、水体污染生态学评价法	150
二、水体污染的生理生化评价法	158
三、水体污染的细菌学评价法	161
四、植物在环境监测中的应用	165
第三篇 环境治理中的生物学机理问题	171
第一章 碳水化合物的转化	171
一、多糖的水解	171
二、葡萄糖的无氧分解——糖酵解	173
三、葡萄糖的有氧氧化	179
四、糖的有氧氧化与无氧分解之间的联系和生理意义	186
第二章 脂肪和蛋白质的转化	188
一、脂肪的分解	188
二、蛋白质的转化	192
第三章 废水处理的生化反应	196
一、好气和厌气生物处理的基本原理	196
二、工业废水处理中某些有机物质的转化	201
三、无机物质的代谢	205
第四篇 环境生物学研究方法概论	210
第一章 环境污染的生态学研究方法	210
一、浮游生物的采集和保存	210
二、底栖动物的采集和定量	214
三、鱼类毒性试验	217
四、水中细菌的采集和测定	222
五、大气污染对植物影响的调查研究方法	225
第二章 环境污染治理中的微生物研究方法	228
一、菌样的采集与增殖培养	228
二、培养基的制备	229

三、菌种的分离与筛选	232
四、微生物的观察	235
五、微生物的测定	238
六、灭菌、消毒与菌种保藏	241
第三章 其他研究方法	243
一、活性污泥生理生化指标的测定	243
二、生物体内污染物质的检测方法	247
附录一 常见细菌检索表	251
附录二 活性污泥中细菌在分类学上的位置表	257
附录三 废水生物处理中常见的原生动动物检索表	260
附录四 防污绿化植物查对表	272
附录五 废水生物处理中常见的原生动动物图	278
主要参考文献	284

前 言

近年来，环境污染已成为人们日益关心的重大公害问题。环境保护已是世界各国的主要研究课题之一。

环境科学是一门综合性很强的新兴学科，是研究环境质量及其控制的科学。它的产生可以认为是七十年代初自然科学向广度和深度发展的一个重要标志。环境科学充分利用化学、生物学、毒理学、地质学、自然地理学、土壤学、气象学和医学等学科的原理和方法，对人类活动引起的大气、水质、土壤和生物环境的问题开展系统的研究。尽管目前各国对环境科学的研究范围不尽相同，但研究的重点都是摸清污染物质在环境中的运动规律及其引起的环境质量变化，污染物的生物效应和对人体健康的影响，以及控制和改善环境的原理方法和技术。

恩格斯指出：“科学的发生和发展一开始就是由生产决定的”。从本世纪五十年代以来，资本主义世界出现了一系列“公害”事件，引起了人们对造成环境污染问题的强烈关注。六十年代末，七十年代初，一些资本主义国家的环境污染问题已发展成为十分尖锐的社会问题，严重地危及人和生物圈的生存和健康发展，这就迫使人们去研究和解决这个问题，于是，环境科学便应运而生。概括地说，迄今为止，环境科学的发展大致可分为三个阶段：六十年代以前是以治为主的阶段，这一阶段在分门别类的单项治理技术方面取得了一定的成果，在环境质量方面略有改善。六十年代末开始进入防治结合，以防为主的阶段。除单项治理技术继续取得进展外，突出的成就是逐渐拟订并实行了环境问题综合防治对策。如进行了工艺改革、研制无害化工艺，发展闭路循环，建立环境影响预断评价制度等。这一阶段虽然一直延续到今天，但从七十年代中期又出现了新苗头，越来越明显地过渡到一个新阶段。人们正在为创造更美好的环境而奋斗，使环境科学开始以一门综合性很强，体系庞大的独立学科而置于世界科

学之林。到目前为止，逐渐形成了许多新的分支学科，如环境生物学、环境地质学、污染化学、环境声学、大气环境学以及环境医学等。这些分支学科的产生，将会进一步丰富和完善环境科学的内容。

环境保护生物学，是研究生物和环境统一的科学，实际上是一个生态学范畴的学科。但它不是传统的生态学，而是现代的环境生态学，即不但是主要研究生态系统的结构功能、生态系统受污染作用与对环境产生反作用的一门科学，而且也是研究生物对改造、治理污染环境的规律、作用机理与环境污染生物学评价和监测预报的一门科学。

因此，环境保护生物学主要应包括以下内容：

1. 运用生物学的基本原理和基本方法研究环境质量的生物学评价，通过不同区域环境生态系的总体分析，找出反应不同环境质量状况的生物学特征指标。

2. 研究污染物质通过食物链迁移、富集和变化的环境生物学规律，从而为人类自觉地影响生态系统中污染物质和能量循环过程，有效地防止和切断污染物进入人体，保证人民健康和生命安全提供理论依据。

3. 通过对污染物的生物净化与降解、生化机理的研究使之成为改造环境的有效手段，以促进环境生物工程的不断发展。

4. 研究环境污染的生态学问题，诸如污染环境特点；生态作用与生物对环境的改造能动性。利用现代数学和计算机技术研究环境污染的生物学问题等。

5. 研究环境污染的生物监测。

环境生物学和整个环境科学一样，刚刚产生，因此对于它的定义、概念和内容还不十分清楚，理解也不一致，这些都需要通过实践不断完善。

根据现阶段人们对环境生物学的研究内容，本书介绍了有关生态学的基本概念，污染环境对生态系的影响和作用原理；重点地介绍了污染环境的治理生物学问题，包括环境污染的生物防治

原理及研究方法等，以期为污染的生物防治奠定一定的生物化学理论基础。

本书原为适应教学急需所编，因此在内容处理、章节次序安排方面考虑教学较多。由于该书涉及的面和范围广泛，是生物学方面一个综合性很强的学科，所以在编写观点和内容处理上肯定会有很多错误和缺点，恳请读者批评指正。

在本书编写过程中，西北大学生物系系主任李中宪教授给予了热情指导，并审阅了全书，提出了许多宝贵的修改意见，谨此表示衷心的感谢。另外该系植物教研室生态组王文杰副教授和我院环境工程系于泮池副教授、张希衡同志，也对本书编写工作提出过许多有益的建议和意见，趁此一并致谢。

作 者

于西安冶金建筑学院

第一篇 环境污染的生态学问题

环境污染生态学是环境科学的一个重要分支学科。它是研究生物与污染环境之间相互关系基本规律的科学。

目前有些国家已采用系统分析和计算机技术，以生物学为中心，将地学、物理、化学等基础学科结合起来，对生态系统进行系统分析，最后建立数学模式，对某一区域（或水体）生态系的结构功能进行数学模拟研究，以认识生态系统及其过程，及时指出某一地区的污染现状，为预测预报及采取预防措施，恢复提高生产力提供依据。从而使已有七十多年历史的传统生态学，开始跃进到一个新阶段，使其从定性描述转而进入定量化，并吸收了生物学中最新成就，即用分子生物学的成就来探索生态系统中的微观秘密。

第一章 环境污染的生态学原理

早在1866年E. Haeckel就提出了生态学这个名词，他定义为：“生态学是研究生物及环境的相互关系”，这个概念一直沿用至今。也就是说生态学是生物科学的一个领域，它是研究生物与其生存环境之间相互关系的一门学科。

生态学大体上分为两个主要部分，其一是以生命组织的层次性为基础，即包括细胞、个体、种群三个层次的种群生态学；而另一方面则是围绕着相互作用的不同种类集合体为基础的群落生态学，这种生物集合体及其环境所组成的机能系统即为生态系统，有的称为系统生态学。

当然，生态学本身又可分为植物生态学、动物生态学和微生物生态学。所以说生态学是一个广义的名词。

一、环境与环境污染

（一）环境的概念

环境有自然环境和社会环境之分。从环境保护的意义上讲，

目前人们所理解的环境主要是指自然环境，它是人和一切生物赖以生存和发展的物质基础。

自然环境是指我们周围的各种自然因素的总和，它包括大气、水、土壤、生物等，人们常称为环境因子。从生态学角度来看，在环境因子中，对生物有作用的因子叫生态因子，而各生态因子综合在一起对生物的作用，则称为生态环境。

生态因子一般分为以下几类：

(1) 气候因子：如空气、光、温度、降水量。

(2) 土壤因子：包括土壤结构，物理化学性质及土壤微生物等。

(3) 地形因子：指地势状况和周围环境。

(4) 生物因子：包括动植物及微生物的作用。

(5) 人类因子：这是直接对生物及所有生态因子的各种影响。

在自然界中，各种生态因子并不是孤立存在的，它们之间相互影响、相互制约，它们总是综合地作用于生物，致使生物的生长发育、形态结构和生理功能等发生相应的变化，以适应变化了的环境，这就是环境对生物的生态作用。人们在研究环境对生物的生态作用时，不仅要注意环境的综合作用和影响，而且也尽力找出在一定条件下影响生物的主导因子，从而为采取相应的管理措施提供依据，这是研究生态的一个重要方面。

目前我们所说的环境污染生态学，就是把污染看作一种特殊的生态因子，研究它对生物以至人类的生态作用。

(二) 环境污染的基本特征

现今的环境污染，或者环境破坏问题，实际上只是考虑人类社会进行活动的结果。一般认为，由于人们的生产活动，使环境的组成成分或状态发生了变化，与原来的情况相比，环境素质恶化，扰乱和破坏了生态系统和人们的正常生活条件，就叫做环境污染。具体来讲，环境污染是指有害物质（主要是工业“三废”）对大气、水质、土壤和动植物的污染，以及噪音，放射性物质与

不合理的自然资源开发利用等对环境的损害。

1. 水体污染

水，作为生物的环境因素，有三个重要特性，即密度大、比热大、溶解能力大。这对水生生物的生活是极其有利的，按面积说，各种水生生态系统在地球表面居于主导地位。

由于工业废水和生活污水未经处理，任意排入江河湖海，严重造成水体的污染，它不仅妨碍工农业、渔业生产，影响水生生态系统，而且还直接或间接地危害人体健康。据报导，七十年代初期美国每天排放废水四亿吨，全国主要河流几乎全遭污染，五大湖已成为毒湖，伊利湖水银含量超过卫生标准十四倍，鱼类全部灭绝，虫类也很难找到。五十年代初期日本由于饮水和食物中含汞、镉等有毒物质，发生了有名的“水俣病”和“骨痛病”。有关资料介绍，我国每天大约有四千万吨工业污水，90%以上未经处理，任意排放造成了水体的污染，由此可见，水体污染的危害是相当严重的。

水体中污染物质众多，包括有毒物质，油类物质，无机化合物和矿物质，耗氧废弃物，放射性物质以及致病微生物等。现将它们的污染来源，作用特点分别介绍如下：

(1) 有毒物质：这类物质对人、畜、鱼类及植物具有毒性，是最主要的污染物质。其主要来源如表1-1-1。

表 1-1-1 某些有毒物质的主要来源

污染物质	主 要 来 源
镉	金属矿山、冶炼厂、电镀厂、电池厂、特种玻璃厂、化工厂等
铜	电镀厂、化工厂、铜氨法人造纤维制造厂等
铅	金属矿山、冶炼厂、铅再生厂、汽油、油漆厂、电池厂等
铬	矿山冶炼厂、电镀厂、铬鞣皮制革厂、化工厂、合金制造厂等
汞	汞极电解食盐厂、汞制剂农药厂、汞精炼厂、某些化工厂、温度计厂等
砷	矿石处理厂、药品厂、玻璃厂、涂料厂、农药厂、化肥厂等
氰化物	电镀厂、焦化厂、煤气厂、金属清洗等
有机磷、氯	农药厂
酚	焦化厂、煤气厂、炼油厂、合成树脂厂

在有毒污染物质中，以重金属及难分解有机物（如酚、有机氯、多环芳烃）的毒害最大。

（2）油类物质：主要来源是石油，机械加工，汽车和飞机的保养维修、涂料、油脂加工以及工业废水和船舶运输漏油等。这一类物质污染水体以后由于覆盖了水面，致使水中溶解氧减少，造成恶臭，影响水质。

（3）无机化合物和矿物质：主要来源于各种化工厂。包括各种水溶性氯化物、盐类和其它各种酸、碱物质。这类物质浓度过高时会降低水质，危害水生生物，过强的酸性或碱性还会影响植物的正常生长。

（4）耗氧废弃物：它来源广泛，如造纸厂、纤维厂、食品厂的废水和生活污水等。其中包括有机物和无机物两类。前者主要是可被生物分解的天然有机物；后者主要是还原性物质，如硫化物、氨等。这类物质经水中生物氧化和化学氧化时，大量消耗水中的溶解氧。如果水中含有大量耗氧废弃物时，会使水中缺少溶解氧，导致水质恶化，产生恶臭，甚至使鱼类死亡，并对水生植物产生不良影响。

（5）植物营养物质：主要来自合成洗涤剂、化学肥料、饲料和生活污水等方面。包括氮、磷、钾等化合物，是植物生长所需要的养分。这些物质能促使水中某些植物（特别是藻类）大量繁殖，使水中的溶解氧减少，危害鱼类，恶化水质，甚至使水发臭。目前引起世界各国注意的水体富营养化作用，形成所谓的“红潮”，就是这类污染物排入水体造成的。

（6）其他：如来自各种生活污水中的致病微生物。来自热电厂的热流出物。原子能工业的放射性物质，以及各种冲积物等，都污染水体，影响环境，危害人体健康，破坏生态系统。

2. 大气污染

大气是指围绕在地球周围起着保护人类、动物和植物生存的空气层。这一空气层厚度达1000公里。离地面越远，空气越稀薄。接近地面的空气密度最大，与人类和生物的关系也最为密

切。

正常大气（干燥状态）的主要组成（按体积计算）为：氮气约占78%，氧气约占21%，氩、氦、氖、氪等惰性气体约占0.94%，二氧化碳约占0.0%，其它如水蒸气、尘埃、烟气、工业气体、微生物等所占的比例大都随时间、地点而发生较大的变化。烟尘和工业废气所占比例虽然不大，但对大气品质影响很大，当它们超过一定浓度时，就会污染大气，对人类及动植物产生危害。

美国因大气污染而造成的经济损失每年达一百五十亿美元，绿化树木的枯死和花草凋谢更是不可胜数。目前我国工业及民用炉窑每年排入大气的烟尘约为一千四百万吨，排入大气的二氧化硫为一千五百万吨，对人、动植物、农牧业生产都造成严重的影响。

污染大气的物质有几十种之多，按照它们的物理化学性质可分为两大类：（1）有害气体，它们以气体状态存在于大气中，如二氧化硫、一氧化碳、氟化氢、氮氧化物等；（2）灰尘烟雾类，它们都以固体或液体微粒散浮在空气中，如煤烟、煤尘、光化学烟雾等。虽然如此，但在城市大气污染中数量最多，危险最大的主要是烟尘、二氧化硫、一氧化碳、氮氧化物、碳氢化合物以及由后两种经光化学反应而产生的光化学氧化剂等六种。这些大气污染物主要来自火力发电厂、民用炉灶、工业锅炉和工业炉窑的燃料燃烧以及工业生产过程和交通运输三大方面。

3. 土壤污染

土壤是环境中特有的组成部分，在环境中起着三种作用。由于土壤中有各种微生物和动物，可以转化和分解进入土壤的各种物质，对环境起净化作用；土壤中复杂的有机的和无机的胶体体系，具有巨大的表面积，能吸着、吸附各种离子和某些分子，对某些物质起着蓄积作用；由于植物直接生长在土壤上，因而土壤就成为植物营养物质的主要供应地，对物质起着转化和转移的作用。

目前从外界进入土壤的物质，除肥料外，大量的、广泛的是农药，此外还有“工业三废”带来的各种有害物质。这些污染物质在土壤中有三条转化途径：

- (1) 被转化为无害物质，甚或为营养物质；
- (2) 停留在土壤中，引起土壤污染；
- (3) 转移到生物体中，引起食物污染。

土壤污染包括重金属和有机污染物、农药与病原体。按其来源分为三类：工业污染、农药污染和生物污染。

污水中造成土壤污染的有害物质主要有各种有害金属，如汞、镉、铅、铬、锌、铜等；砷化物，氰化物等有害无机化合物；油类；酚类、醛类、胺类等有害的有机化合物；酸碱和盐类及其它如致病菌类、悬浮物等。

大气造成土壤污染的主要物质有汞、铅、镉、铬等金属，以及 SO_2 等形成的“酸雨”对土壤的酸化作用和某些粉尘对土壤的碱化作用。

工业废渣经过雨水冲刷，大量进入农田，也会恶化土壤。

以上这些都是工业三废对土壤的污染，特别是一些地方采用污水灌溉农田，虽然有一定的增产作用，但却造成了土壤的严重污染，经过作物的富集，最后影响到人、畜的安全，这是很值得注意的。

关于化学农药的污染问题，已成为近年来人们十分注意的重要环境污染源之一。农药不仅污染大气和水，特别是对土壤的污染，直接关系到农业生产和人、畜的安全。化学农药对土壤的污染主要表现在以下几方面：

- (1) 为了防治作物病虫害和杂草，直接施农药于土壤中。
- (2) 由于在作物上喷撒药剂，直接落在地面上；或由作物上再落到地面上；或漂浮在空气中的农药，因降雨而进入土壤中。

另外大量使用化学肥料，生长刺激素等也造成土壤污染。

工业污染不仅直接影响农作物生长和产量，而且由于这些污

物被作物吸收残留，通过食物链的关系，最后危害到人类的健康。

环境污染物不仅直接影响到生物，而且会通过改变其他环境因素，而间接地影响有机体的生命活动。例如由于悬浮物质散射和吸收光线，妨碍了光的透入，导致水环境中光合作用减弱或完全停止，使整个水生生态系统趋于瓦解；近代动力厂等排出的热流出物造成热污染，常常消灭了一个地区有价值的鱼群。

众所周知，人类的活动既有生产性的，也有非生产性的。上边我们所介绍的环境污染主要是人类生产活动所引起的。至于非生产性的活动，如居住规划，生活废物处理，环境卫生等等，也都与环境有关。

二、种群和群落

种群和群落生态是生态学的主要组成部分之一，称为群体生态学，它是研究群体与环境之间的相互关系的科学。

(一) 种群

种群是生长在一定群落中的种的个体的总合。换句话说，种群是指占据某一地区的某一个种的一群个体。一个池塘中的芦苇种群即是一例。

就浮游生物而言，栖息在一个地区的生物称为种群，它可以只包括一种生物，称为单种性种群，也可以包括几种生物，称为多种性种群。一般生活在自然界的种群，称之自然种群(如鱼类、哺乳类等)；培养在实验室内的种群，称为实验种群(如单细胞生物的酵母；草履虫和昆虫等)。

种群生态，主要研究以下几个问题：

(1) 种群的生长和大小。一般生物的种群和生长过程可分为增长期、平衡期和下降期，通常用S曲线表示。

种群大小常受外界环境因素影响，特别是温度和食料的影响最大，这在浮游生物中表现尤其明显。

(2) 种群的年龄组成及其变化。它是影响种群生长和大小的重要因素。所以也是种群生态研究的一个重要问题。根据

年龄组成可将其分为生长种群（幼体+成体 $>$ 老年），静止种群（幼体+成体=老年）和衰落种群（幼体+成体 $<$ 老年）。对浮游生物来说，生长种群出现在繁殖盛季，而衰老种群则出现在生殖结束之后。

（3）种群密度，主要指单位时间或空间内种群大小。它是随时间增加种群密度愈大。一般讲，外界环境愈好，种群密度愈大。因此通过种群密度研究，既可以了解种群动态，又可以阐明种群和环境之间的关系，所以它也是种群生态的重要问题之一。

（4）种群数量变化，这是种群，特别是自然种群的主要生态变化特征。通常环境变化愈大，种群数量变化也愈大。而这种数量变化主要表现在时间和空间变化上。例如昼夜变化、季节变化、逐年变化，以及垂直分布和水平分布等等，当然不同生物种类的变化也是不同的。

研究种群的目的，在于更深入地了解和分析群落，特别是研究种群不同生长发育阶段对环境条件（包括污染环境）的反应，有助于我们在群落的控制和利用方面采取具体措施。这对于研究环境污染对生物群落的影响具有重要的意义。

近年来工业污染物成为影响种群增长的重要因素。污染物除了可以直接杀死有机体外，还可能不杀死有机体，但具有伤害繁殖的灾难性后果，使得种群处于衰减趋势。据调查，沿康涅狄克河，繁育的鹌在1952年尚有150对，到1969年只剩下5对了，主要是由于河流被污染的缘故。

（二）群落

当我们研究一地的植物界时，可以从两个观点角度去研究。第一，从分类学观点出发研究这个地区的植物区系，即统计这个地区的植物种类及其亲缘关系。因此一个地区的植物区系就是这个地区所有植物种类的总和，例如中国植物区系，庐山植物区系等。另一种观点是从生态学观点出发去研究这个地区的植被，也就是研究这一地区地表植物覆盖的情况。即植被是由植物群落组成。或者，一个地区的全部植物群落的总体称之为该地区的植

被。

什么是生物群落？它是一种多生物种的系统，这是一种有规律的组合系统。换句话说，生物群落是生活在一定地区(或生境)的种群的集合。例如一片草原，或一片橡树林就是一个群落。因为生物群落是由植物、动物和微生物三个部分组成，所以它又可分为植物群落，动物群落和微生物群落。在实际工作中植物群落最容易划分，因而研究较多，也比较深入。

群落有些什么特征呢？这主要是：

(1) 每个群落都由一定的植物种类组成，具有一定的结构状况和一定的物质生产量(群落的结构)。

(2) 每一个群落在一定的地段的环境条件下存在，并有与之相适应的特点和作用(群落的生态)。

(3) 每一群落在时间上有它发展变化的规律(群落的动态)。

(4) 每一个群落在空间上有一定的分布规律(群落的分布)。

下边主要介绍群落的结构与动态变化。

1. 群落的结构

所谓群落的结构，主要从以下几方面去分析。

(1) 群落的种类组成：研究一个植物群落，首先要知道它有些什么植物以及这些植物所处的地位和作用。天然或半天然的植物群落，总是由好多个植物种类所组成。通常以群落最小面积内含植物种类表示。所谓最小面积，就是说至少要这样大的空间，才能包括组成群落的大多数植物种类，因而这个面积就能表现出群落结构的主要特征。一般说组成群落的植物种类越多，群落的最小面积越大，而且环境越优越。群落结构越复杂，组成的植物种类也越多。例如我国的西双版纳热带雨林群落，它的最小面积至少为2500平方米，其中包含130种左右的高等植物；而东北的小兴安岭红松林的一个群落中，植物少得多，它的最小面积约为400平方米，包括的主要高等植物约40种左右。由此可见，从环境条

件的优越程度和植物种类多寡，群落复杂程度和最小面积大小等方面找到一定的相关性，即呈正比例的关系。

从群落的发生学观点来分析植物区系，可以将组成群落的全部植物划分为以下四种：

特有种：仅在该区域所特有的种。

非特有种：除该地区外，其它地区也可发现的种。

假特有种：是在该区域外发生的，现在成为该区的特有种。

泛布种：在该区域外发生，而且在其它群落中都可以发现的种。

(2) 种在群落中的数量和质量：当我们知道组成植物群落的种类以后，还要进一步了解各个种在群落中出现的多少及其生活状况，这方面主要表现在群落的多度，盖度，生活状况和频度上。通过对这些问题的分析，有助于进一步对群落结构的了解。

1) 多度：是种在群落中的个体数目。测定的方法有直接计数法和目测法。在欧洲及我国常用较为简便的等级制来表示。如德鲁捷的六级制可用如下几种符号表示。

VI		地上部分郁闭
V	COP ³	很多
IV	COP ²	多
III	COP ¹	相当多
II	SP	稀疏
I		零星

此外还有用“Un”单株表示的。

2) 盖度：盖度有助于表达植物外观和其地上器官的特征。它主要决定于植株的生物学特性，如分枝多，叶大则盖度大，反之则盖度小。所谓盖度是指在群落中各种植物遮盖地面的面积，通常用目测估计，按所占单位面积的百分率或十分数来表示。一般盖度越大，说明它在群落中起的作用越大。

3) 频度：它是在某一群落中，各种植物在各小区中的出现率。频度不但可以指出各种植物在群落中的分布情况，也可以指

示密度，所以有人在稠密的群落中不求多度而求频度。可按下式求得每种植物的频度系数：

$$R(\text{频度系数}) = \frac{\text{某种植物出现的次数}}{\text{小样地数}} \times 100$$

例如：在50个小样地中（草原群落中，常用1平方米的小样地，一般面积要小于群落的最小面积），甲种出现于40个样地，其频度系数 $R=80\%$ ；乙种出现于24个样地，则 $R=48\%$ ，如此类推。

此外，一个群落中各种植物生长发育情况或生活力（即茂盛度）也表明了种对环境的适应情况，可以判断各种植物对环境的要求，以及环境条件对植物生育的影响，例如污染环境对植物生育的影响。这些都有助于对某一群落结构的分析和认识。

（3）群落的结构：这里主要介绍植物群落的成层现象。由于植物的稠密生长，导致了群落内部环境的逐渐分化，群落内的光照、温度和湿度条件及空旷地面等大不相同，也就是在群落内的不同高度上这些因素变动规律不同，因而只有那些能够适应于这种环境的植物才能生活在一定高度范围内，形成群落中的一个层次。所以一定层次有一定的植物组成，而且具有一定的生境特点。

成层结构是植物群落的一个重要特点，这种现象在温带森林中最为明显，对一个完整的森林群落，一般地上层次可以划为乔木层、灌木层、草本层和地被层等四个基本结构层次。有的层次还可分出亚层（图1-1-1）。各种植物不同深度的根系，形成地下层次。此外还有一些附生、寄生植物和藤本植物，成为一种层间植物。水生植物同样表现出层次现象，组成水生植物群落。

群落结构的层次数目与其所处环境条件和发育年龄有关，一般在有利条件下，群落下层数目增加；群落年龄较老，则层的结构也就复杂一些。

根据植物种在层片中的作用大小，可以把整个群落中的植物种分为：

1）建群种：它是植物群落的建造者，是层片中的优势种。建群种具有最大盖度和植物总物质量，而且在形成群落的环境中



图 1-1-1 群落的垂直结构图示

起着最主要的作用。

2) 优势种：每一个层中都有一个优势种，它在这个层中具有最大量的植物体和最大的盖度。

3) 附属种：这个种个体数量和盖度都比较小，对群落环境的形成作用不大。

2. 群落的动态变化

植物群落的动态是一个非常广泛的概念，有着不同的表现形式。这里介绍一些主要变化，着重谈谈群落的演替规律问题。

植物群落随着湿度、降水等天气的变化，而引起一种气候特征的变化，但这种不同季节性或不同年份内的周期性变化，始终没有超出该群落的范围，不是由一个群落变成另一个，只是群落外貌或组成种有所变化而已。

所谓演替，就是一个地段上，一个植物群落被另一个植物群落所代替。

(1) 裸地：由于自然因素或人为因素的作用，使原有的群落全部毁去，这种没有植物生长的地段称为裸地。它是群落的形

成、发育和演替的最好条件和场所。

裸地可分为两类：从来没有植物生长和覆盖的地段（冰川移动，流水沉积，火山喷发等形成的裸地），称为原生裸地。另一种是原有群落虽被消灭，但其土壤多少有所保留，甚或还有某些原来群落中的植物繁殖体，称为次生裸地。

我们研究裸地的成因和类型，了解各种裸地上的环境条件和特点，目的在于消灭裸地，将为荒地绿化、改善生态系统等提供可靠依据。

从原生裸地上开始的群落演替叫做原生演替，在次生裸地上开始的演替则叫做次生演替。不论哪一种演替，都是成顺序发生的一系列的趋向性的演替过程。

（2）植物群落的原始演替：一般对原生演替的讨论，多为从岩石表面开始的旱生演替，和从湖底开始的水生演替。这两种类型代表了两类生境的极端类型，尤其在这种生境上开始的群落演替的早期阶段中，各地几乎相似。

1) 旱生演替系列

在一块光秃的岩石表面，生境非常严酷，没有土壤，极为干燥，温度变化幅度也极大，在这种岩面上旱生演替系列是：

裸岩→地衣群落→苔藓群落→草本群落→灌木群落→乔木群落。

其中，前两个群落阶段延续时间最长，草本群落阶段演替最快。而木本植物群落演替速度又逐渐减慢。

2) 水生演替系列

在一般淡水湖中，由于一些浮游生物残体的大量堆积，加上湖岸冲刷下来的矿物淤积，使湖水变浅，以至湖泊发生填塞。随着这个过程而发生了相应的植物群落的演替。这种演替规律是：

沉水植物群落→浮叶植物群落→挺水植物群落→湿生植物群落→中生植物群落（森林）。

由此可见，水生演替系列，实际上是一个植物填平湖沼的过程。

上述群落原始性演替，反映了群落生活型组成和环境的更替。随着更替系列进展，群落结构愈复杂，高度增加，因此对环境利用更充分，改变环境的作用也会更大。也就是说演替的结果，会导致严酷的环境向中性转变，直到植物群落更好的适应该地区气候条件的稳定状态的转变，这时群落具有相对的稳定性，称为演替顶极。

此外，还有植物群落的次生演替，它是外界因素，首先是人类经济活动的产物，如森林采伐演替和草原放牧演替，就是实例。

群落与环境（内环境和外环境）有着密切的关系，环境条件影响植物群落形成、结构、演替等等，反过来群落也对环境起着主要的改造作用，这就是我们所以研究它们相关性的原因。

三、生态系统

（一）生态系统的概念

生态系统的概念，早在三十年代已经由英国的生态学家 Tansley 提出，五十年代获得了广泛的传播和承认，六十年代已发

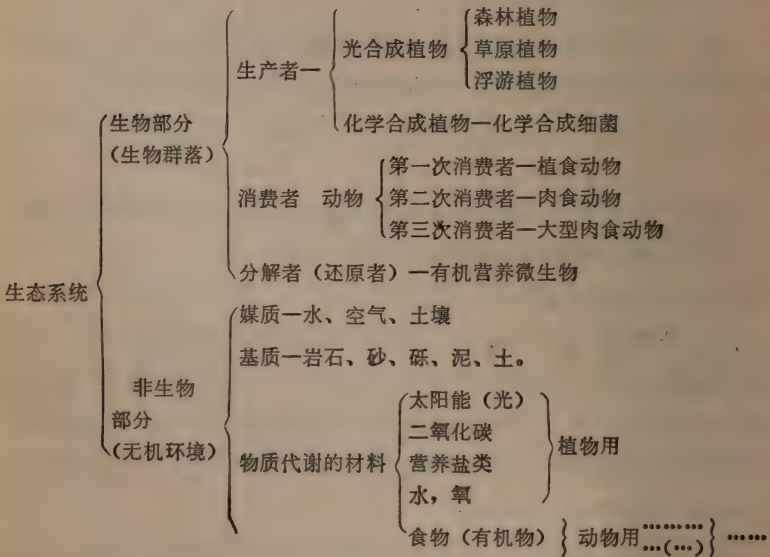


图 1-1-2 生态系统的组成

展成为综合性很强的一项研究，它是近年来生态学研究的主要对象和核心。

生态系统是生物群落与环境的综合体，它包括生物和非生物两大部分（图1-1-2）。

由图 1-1-2 可以看出，在非生物部分中太阳能是所有生命的源泉，除此之外，则是大气、水和营养盐类。生物部分当中，根据德国的Thienemann (1939年)的倡议，可分为生产者，消费者和分解者。生产者是含有叶绿素的绿色植物的总称，以水、二氧化碳及营养盐类为材料，由叶绿素吸收太阳能而制成碳水化合物的有机物质而放出氧气，所以其意义在于把无机物生产为有机物。消费者则是把生产者所制造的有机物消耗，所以人类也属于消费者。动物依赖于其它生物制作食物，因此称之为从属营养生物或有机营养生物。分解者则将动、植物尸体及其排泄物分解为无机物，达到还原为非生物环境效果的生物群，包括大部分细菌及霉菌。分解者从有机营养来看，也是消费者的一员，而从有机物无机化的作用来看，分解者在生态系统中的位置是重要的。因此在整个生态系统中，生产者，消费者，分解者之间相互联系，互相制约，呈现着极其复杂的关系。

生态系统是一个广泛的概念，生物圈是一个巨大而又精密的生态系统，它由以人类活动为中心的无数大小不同的生态系统而组成。目前，生物圈大体上可分为三大生态系统：

1. 陆地生态系统。
2. 淡水生态系统。
3. 海洋生态系统。

此外，还分为森林生态系统、草地生态系统、荒漠生态系统、沼泽生态系统、农田生态系统等等。从广义上讲，城市、工矿区等也都构成了生态系统。因此自然界就是由多种多样的生态系统组成的。

作为生物圈中任何一类生态系统，它们都包含着下列三个生命的基本系统：

- (1) 交流系统,其功能为执行系统的物质循环和能量循环。
- (2) 适应系统,其功能为系统对外界环境产生选择性反应。
- (3) 反馈系统,其功能为维持系统的相对均衡状态。

生态系统正是通过这三个基本系统,维持自身的动态平衡。

(二) 生物圈的意义

生物圈是澳大利亚地质学家 E. Suess 在 1875 年首先提出来的。

因为地球表面层里有空气、水、土壤,能够维持生物的生命活动,所以人们把生物有机体生存的地球表面层叫做生物圈。通常把地球上所有生物及其生活领域(或物理环境)的总和,称为生物圈。生物圈的范围是从地面以下约12公里的深度,到地球表面以上约23公里的高度。也就是包括了大气圈下层和岩石圈上层的整个水圈和土圈。在这个范围内,生命、大气、水圈和岩石圈、实现着互相渗透,特别是生命强烈地影响到所有这些范围,并存在着生命比较集中的范围,尤其是植物在这一范围内能量的积聚中起着主要的作用,这一范围可称为植物地理(或植物圈),也就是狭义理解的生物圈。目前,人类在自己的实践活动中,几乎包括了广义的生物圈的范围,并进入了宇宙空间。

生物圈与生态系统又有什么关系呢?如前所述,生物圈实际上是一个非常精巧而又复杂的巨大生态系统,其中又包含了无数个小的生态系统。每个小生态系统是自然界的一个基本活动单元,生物就生活在生态系统之中,这个生态系统直接受自然环境因素的影响,生物的活动又反过来影响它所需要的环境因素。

当前,世界各国正在开展的“人类与生物圈”的研究计划,就是研究不同类型的生态系统,特别强调研究人类的生产活动对环境的影响,它直接关系到当前世界范围内自然资源的合理利用和管理,以及保护人类环境的问题。计划中的十四个课题是研究在人类活动下,对森林、草原、荒漠、河流、湖沼、港湾、海岸、岛屿和大城市、大建筑工程中各类生态系统的变化,以及这些变化对人类本身的影响。例如人类活动对湖泊、沼泽、河流、三角

洲，河口和海岸地带的价值和资源的生态影响；主要工程建设对人类及其环境的影响；城市系统的生态，特别是能源利用方面的研究等等。因此，生物圈的研究对环境科学基础理论的研究与发展，环境污染危害的综合治理，自然资源的合理开发与利用有着重要的实际意义。

(三) 食物链及其作用

在生态系统中，生产者，消费者和分解者之间，都保持着一种相对的平衡状态，这种平衡状态称为生态平衡。各种生物之间通过食物关系联接起来，即一种生物以另一种为食，而另一种又以第三种为食。这种食与被食的关系互相联接，即形成所谓的“食物链”。换句话说，在自然界中，各种动物为了维持其本身的生命活动，必须以其它种动物为食，这种由食物关系而形成的锁链式的相互制约形式，称为“食物链”(图1-1-3)。在食物链中各生物种的位置称为营养级。实际上，自然界各种生物之间存在着极其复杂的“食物网”关系。

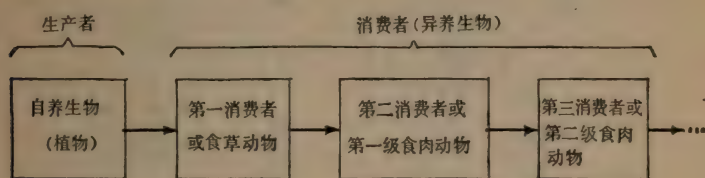


图 1-1-3 食物链内各营养级的名称标志

光合作用固定的能量一半以上用于植物自己的呼吸消耗，一部分被储存起来，然后进入消费者的食物链中，现有两类食物链：

牧草或食草的食物链和腐烂的食物链。能量可以在很长时间内贮存在这两类链中，前一种为动物群体，后一种为未分解的死亡的有机物质以及导致腐烂的生物群。能量流入每一条链的部分对生物圈及人都是极其重要的。

在牧草链中，被植物固定的能量中，约 10~20% 转给素食者，素食者群落的能量 10~20% 转移给一级肉食者，如此类推

(图1-1-4)。由此可见，随食物链中每个营养级的进展，其生物量或能量显著地在减少。

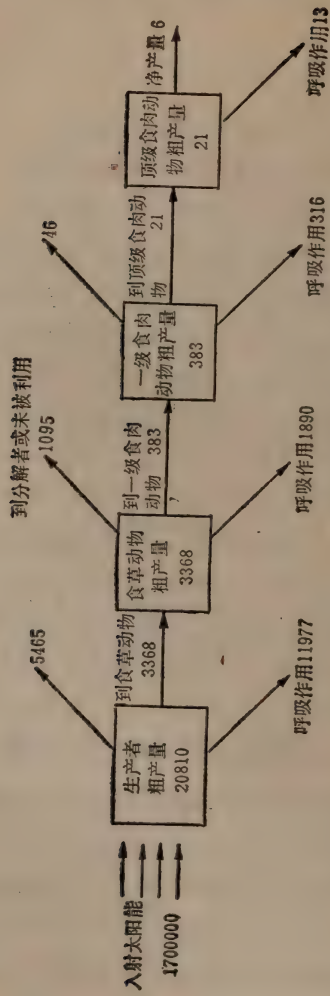


图 1-1-4 佛罗里达州银泉能量流动模式 (千卡/米²/年)*

* 引自Odum,H.T.,: Trophic structure and productivity of silver springs, Florida,Ecol.Moongraphs,27:55, 1957.

在腐烂链中，在陆地上，这些链开端于死的有机物——叶，树皮、树枝的枯枝落叶；在水中起源于藻类残骸，粪便和其他有机物的残渣。有机残渣可以全部被细菌、真菌及吃腐物的小动物消耗，放出二氧化碳、水和热量。它也会进入复杂的食物网络，可能包括较大的动物，以至最后到高等肉食者，可见二链是有联系，互相重叠的。

当环境受到污染时，污染物对食物链产生破坏作用，导致物质和能量循环失调，使整个生态系统平衡遭到破坏(图1-1-5)。

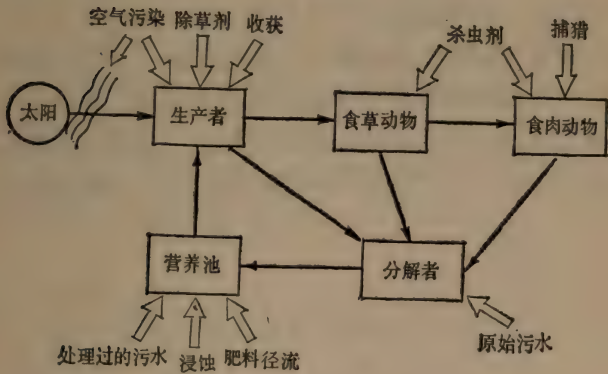


图 1-1-5 人类活动可能破坏生态平衡的一些途径^[31]

从环境保护角度来看，关于食物链问题应注意两点：一是污染物沿着食物链可以到达人体，因为人以动植物为食，而且居于食物链的顶端。二是毒物可以经过食物链而逐渐富集，使其危害程度增高，目前已发现滴滴涕等有机氯农药和许多含有重金属的物质都有这个倾向。因此，为了揭露并掌握生态系统能量与物质循环的规律性，必须抓住食物链这个中心，深入研究，特别是关于污染物通过气—水—土壤—植物进入人类食物链的规律，以便切断食物链的某一环节，防止污染物进入人体。

四、生态系统中的能量与物质循环

(一) 能量流动

绿色植物是利用太阳辐射能进行光合作用，把光能变成化学能贮存在所制造的有机物中的自养有机体，是生态系统中的生产者，因此在生态系统中，绿色植物居于重要地位。动物和其他异养有机体是不能直接利用太阳能的，它们只能依靠生产者来生活，因此称为生态系统中的消费者。这就是说能量通过绿色植物的光合作用进入生态系统。而生态系统的能量转移是通过食物链关系，由一种生物转移到另一种生物的。即从绿色植物转移到草食动物，由草食动物再转移到肉食动物，生产者和消费者死后又被分解者分解，将光合作用的能量释放返回到环境中去。另外，生产者和消费者的呼吸作用都有能量的损失，把部分能量逸散到外界，这一能量单向流动的现象叫做能量流动。所以，生物为了维持生命所需要的能量是通过摄食取得的，可见食物链在能量转移中的重要作用了。生态系统中能量和营养循环如图 1-1-6 所示。

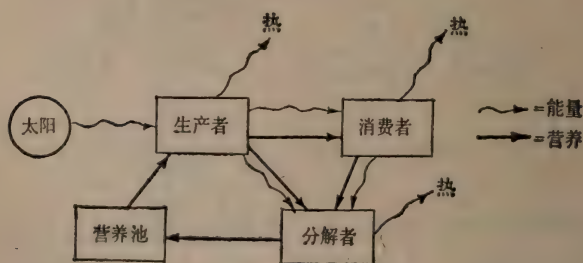


图 1-1-6 生态系统中营养和能量循环^[31] (能量不断被太阳能进行更新)

那么，太阳能用于实际生态系统有多少呢？地球从太阳接受的能量中，约仅有百分之一左右是固定在光合作用中，和地球的总能量收支相比为数不多。从世界范围来说，它相当于 1500～2000 亿吨干有机物的年产量，包括了人类的食物以及生物圈中推

动维持生态系统的能量。这些系统就是指地球上的主要生态系统：森林、草原、海洋、沼泽、港湾、湖泊、河流、苔原与沙漠。这个能量是通过生态系统进行转移流动的。

(二) 物质循环

自然界虽然有许多化学元素是生物有机体生命活动所必需的，但其中以氧、碳、氢、氮和磷最为重要，它们占整个原生质的97%以上。而这些基本化学元素可以通过生物圈进行循环，二氧化碳、水和氧循环的简单模式如图1-1-7所示。

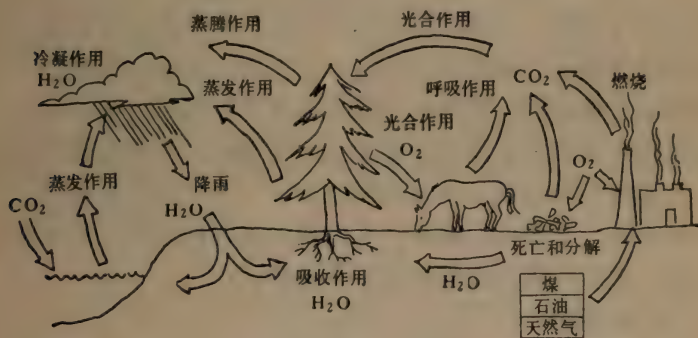


图 1-1-7 生物圈内的水，氧和二氧化碳循环⁽³¹⁾

1. 水循环

水是生物圈中最丰富的物质，它是一切生物有机体的主要组成部分，所以任何一个生态系统都离不开水。水循环为生态系统中物质和能量交换提供了基础。此外水在调节气候，清洗大气，净化环境方面均有重要作用。

地球表面70%被水所占据，这些水如何进行循环呢？主要是海洋、湖泊、河川和大地上的水通过蒸发，变成水蒸气，进入大气层，然后大气层中的水蒸气遇冷凝结成雨、雪、雹、雾等降落到地面。在地面上的水，一部分进入江河湖海；一部分渗入土壤或松散的岩层中，其中一部分成为地下水，一部分被植物吸收。而植物吸收这一部分水大多数又通过植物的蒸腾作用返回到大气

中。以上过程就是水循环。

由于工业废弃物不加处理，任意排入江河湖海，加之农业上过量施用化学农药，因而使水体遭到严重的污染，破坏了水产资源，危害了农业。据初步统计，全世界每年约有4200亿吨污水排入江河，造成5.5亿立方米水体污染，约占世界淡水的三分之一。

2. 碳循环

碳是构成有机体的主要元素。二氧化碳通过植物的光合作用转化为氧和葡萄糖，葡萄糖构成植物体内的碳水化合物。动物吃这些碳水化合物，一部分通过氧化作用产生能量，呼出的二氧化碳又被植物利用，这是碳循环的一个方面；随着这些有机体的死亡和被微生物分解，最后氧化成二氧化碳和水等，这样二氧化碳又被植物吸收利用，第二次参加生态再循环。生物有机体在地质史上形成的燃料化石，经过燃烧增加了大气中的二氧化碳，这是碳循环的第三个方面。此外，火山爆发也可使部分二氧化碳回到大气层，参加生态系统的循环和再循环。

3. 氧循环

氧的循环比较复杂。氧不仅维持着生命，也是由生命产生的。现在大气中的氧，虽不是全部，但几乎主要来源于植物，也就是通过植物光合作用产生氧气。但近代的研究认为，光合作用产生的氧是少量的，而空气中的氧实际上是由其他发生源产生的。可能性最大的发生源是高空中的高能光线，宇宙射线把水蒸气分解掉。

当然人类活动会影响到生物圈中的氧循环和地球上的氧收支。除了吸氧和呼出二氧化碳外，还可以因为燃料燃烧等而降低氧水平，增加二氧化碳的比例。据估计，近10年中平均每年在原基础上使大气圈中二氧化碳增加0.2%。甚或有人估计，从1970年开始到2000年，大气圈中二氧化碳的数量还将增加20%以上，预计将会引起全球性的温度增高。由于二氧化碳吸收红外辐射，只要大气圈内二氧化碳数量增加一倍，温度就增加 2°C ，在增加

3℃时可引起局部地区变暖，增加4~5℃以上时，估计会引起两极冰盖的融化。当然，由于大气中粉尘和二氧化碳的增加，一定程度上减少了太阳辐射强度，会使气温下降，有可能抵销因二氧化碳增加而引起的温度变化，这都有待进一步研究。

4. 氮循环

氮也是构成生物有机体的重要元素之一，它是蛋白质的主要成分。大气中含氮约78%，但植物不能直接利用，只有固氮细菌和某些蓝藻能把空气中的氮转变成硝酸盐，方可被高等植物利用。植物从土壤中吸收硝酸盐等，与复杂的含碳分子结合生成各种氨基酸，许多氨基酸联结在一起形成蛋白质。动物吃了这些蛋白质，构成体内组织的一部分。动物死后，蛋白质被微生物分解成硝酸盐等而回到土壤，又被植物吸收、利用。土壤中的一部分硝酸盐等在反硝化菌作用下，变成分子氮回到大气中。氮的循环过程如图1-1-8。

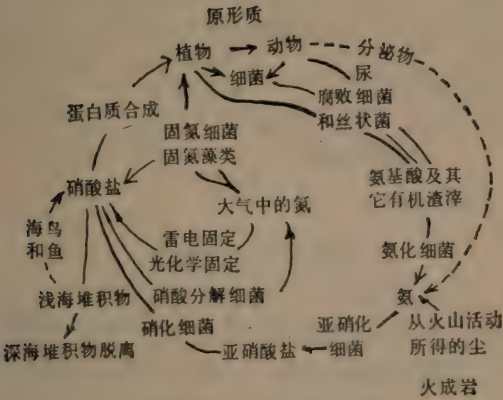


图 1-1-8 生物地理学的氮循环^[29]
(箭头粗细表示重要程度)

氮在环境中起着重要作用。化肥中的氮是引起水污染的原因之一。在燃烧过程中氮被氧化生成的氮氧化物是形成光化学烟雾的重要成分。

5. 磷循环

磷是有机体的另一个重要元素，它参与了为所有生物体提供能量的代谢过程。磷在讨论水体污染中具有重要意义，因为人们过量使用洗涤剂和化肥可以引起水域植物急剧增长。

磷循环如图1-1-9所示，其主要来源是磷酸盐岩石和鸟粪与化石动物的沉积。由于浸蚀或采矿使磷从岩石中移出，然后进入水循环和食物链，经过循环，一部分沉积于深海，直至地质活动方可再次举起；浅海内的磷经海鸟、鱼类转化而返回陆地。人们为生产肥料，开采磷酸盐岩石加速了磷的损失过程。假若每年按照1970年的九千四百万吨的速度消耗磷酸盐岩石，全世界磷酸盐岩石100年即可用完（U.S. Department of Interior (U.S.D.I), 1972）。由此可见，人类活动对磷循环的破坏是何等严重。

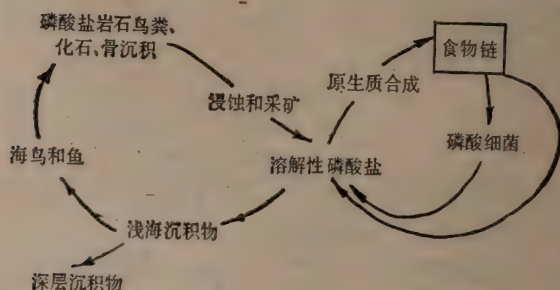


图 1-1-9 磷循环

综上所述，地球上的物质通过各种循环在不停地运动着，物质循环一方面使各种生物之间，生物与非生物环境之间保持着一种相对的平衡。另一方面在循环中物质得到了更新和净化。在生态系统中，物质循环和能量流动都保持着较长时期的相对稳定，这就是前边所讲的生态平衡。但随着条件的改变，特别是人类的活动常常加剧了这种变化，致使生态平衡遭到了破坏。因此，所谓的环境污染与破坏主要是讲有害物质进入生态系统的数量超过了生态系统本身能够降解它们的能力，也就是超过了生态

系统的自净能力，因而打破了生态平衡，使人类赖以生存的自然环境发生恶化。因此，人们又把环境区分为保持原始特点的原生环境（第一环境）和在人类活动影响下已被改变了的次生环境（第二环境）两类。环境保护所涉及的主要是次生环境。

环境一旦污染，治理是十分困难的，不但要花费很多投资，而且需要很长时间才能恢复。例如美国在恢复芝加哥河的水质时，曾花费了三十三年时间。瑞典、日本等国在环境污染的治理中也有同样的问题。特别是重要生态系统的破坏，更不容易恢复。我国现有黄土高原水土流失及沙漠治理的问题就是一例。凡此种种都应引以为鉴。

五、自然界的主要生态类群和系统

自然界的生态系统，主要是水生生态系统和陆地生态系统。由于它们环境不同，所以生物类群也不同。

（一）水生生物的生态类群

水生生物学的研究对象是水生生物类群。水体部分不同，栖息的生物种类不同，人们称栖居生物的水体部分为生活区。每一生活区有与之相应的生物类群，总的来说可分为四大生物类群，即浮游生物，自游生物（或游泳生物），漂浮生物和底栖生物

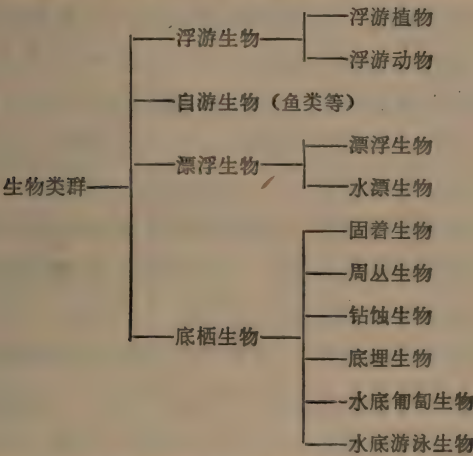


图 1-1-10 水生生物类群

物（或水底生物）（图1-1-10）。

浮游生物是运动器官非常不发达生物的总称。这一类生物大多数个体微小，没有运动能力，只靠水流而被动移动着。浮游生物是水生生物界数量最多的一类，种类多，分布广。藻类、原生动物、轮虫等均属此类。

自游生物是一类具有发达运动器官、运动能力很强的大型动物，主要是鱼类和一些水生哺乳类等水生生物。

漂浮生物是指在水面生活的生物总称，如水浮莲，水生昆虫，某些双鞭毛虫类等。

底栖生物是栖息在水域底部和不能长时间在水中游动的各类生物组成，它是一个很大的生态类群。由于底栖生物多数不能远距离移动，所以可作为环境污染指示生物。

（二）水生生态系统

根据水中溶解盐类的数量，自然界的水域主要分为淡水和海水两大类。相应地，水生生态系统主要包括淡水生态系统和海洋生态系统。

1. 淡水生态系统

淡水水域的含盐量一般在 $0.01\% \sim 0.5\%$ 之间。在这一水域内其环境特点是不稳定，与海水水域相比，在生物群系组成上也有许多不同的特点，主要表现为：（1）生物种类显著减少。

（2）淡水生物地理分布广，原生动物和轮虫尤为明显，分布于全世界。（3）淡水生物变异性极大，很多形成了变种，这与淡水环境中物理化学条件变化大，有着密切的关系。

淡水生态系统常有湖泊、河流等生态系统之分。就湖泊生态系统来说，根据养分和生产量，可以将湖泊分为贫营养湖和富营养湖两类，其主要特征如表1-1-2所示。

从地质时间的尺度来看，贫营养湖是向富营养湖的方向发展的。由于从河流经常输入的沉积物和溶解养分，使湖泊变得越来越浅。生产率变得越来越高，最后变成富营养湖。如果这种沉积作用继续发展下去，最后会变成沼泽。因此，通过地质和生物过

表 1-1-2 不同类型湖泊的主要特征

特 征	贫 营 养 型 湖	富 营 养 型 湖
湖的形态	很深, 岸边浅滩或狭或无	较浅, 岸边浅滩常宽广
水的分层	表层水量少于底层水量	较深的湖表层水量大于底层, 浅湖不分层
水 色	水色淡, 常为蓝色或蓝绿色	浓色, 绿色, 黄绿或褐绿, 常有“水花”
透 明 度	高(大)	低或很低
底 质	有机物质少, 多不腐烂	有机质多, 腐殖质少
溶 解 氧	接近饱和态, 夏、冬两季表、底层含量一致	夏季各层含量不同, 底层少或无。冬季, 冰冻期较深的湖, 各层大致相同, 浅湖常缺少
溶解无 机盐类	总量少, 氮磷量少, 钙 量不一	总量多, 氮磷较丰富, 钙量一般多
溶解有 机物质	很少, 腐殖质无或仅有少量	含量多, 腐殖质少量
沿岸植物	少	多
浮游生物	数量少, 种类较多, 主要是硅藻, 甲壳动物	数量多, 种类少, 主要是蓝藻, 鞭毛藻, 硅藻, 轮虫及甲壳动物
底栖动物	数量少, 种类多, 标志动物为Tanytarsus常很多	数量多, 种类少, 标志动物为 Chird Onus Plumous

程而引起的由深湖到沼泽的演替, 即所谓富营养化作用, 实质上只不过是一种缓慢的自然过程。但人类生产活动常常无意识地加速了这一过程。例如开垦农田, 建筑等, 大大增加了流入湖泊的沉积物负荷, 扩大了湖的沿岸带, 降低了深层容积, 使输入湖泊中的无机营养物大量增加; 农田迳流, 森林采伐和焚烧, 特别是城市垃圾, 生活及工业污水(如洗涤剂)可以把大量的硝酸盐和磷酸盐等带入湖泊。一旦上述物质输入量超过了地球化学调节的

能力时，湖泊生态系统发生改变，生产水平增高，但从人类对水生生态系统的综合利用来看，许多是不合乎需要的。

湖泊的富营养化的主要表现是由于养分比较丰富，刺激了某些浮游植物，特别是某些蓝藻和各种各样的硅藻的大量繁殖发展，在水面形成“水花”，这些藻类残体分解时，消耗了水中大量的溶解氧，从而引起鱼类和其它动物的死亡。与此同时，生物区系发生改变，不合乎需要的野杂鱼代替了正常捕捞的鱼类。因此湖泊的富营养化不仅影响水质和环境，而且直接危害到渔业生产。这方面例子很多，不一一列举了。

2. 海洋生态系统

海洋具有丰富的水产资源，是人类食物，特别是蛋白质食物的主要来源之一。据统计海洋每年可为人类提供三十亿吨的鱼贝类，因此保护海洋环境是环境科学的一项重要研究内容。

海洋也可分为水底区和水层区。水底区可分为两大系，即浅海系与深海系。水层区从水平方向上，又可分为沿岸区和大洋区两大部分。

我国黄海，渤海的全部和东海的大部分，都在200米等深线以内，沿岸区面积相当广阔。沿岸区也称浅海区，理化因素有季节性和突然性变化，由于大陆径流的影响，海水的营养元素和有机物质很丰富，因而这里生物种群也十分丰富，植物（主要是藻类）的生产量很大，生物多是广温性和广盐性种类，这一区拥有许多海洋渔业，是海洋渔业的重要基地。

大洋区也称远洋区，占世界海洋的大部分，其重要特点是空间广阔，垂直幅度很大。水中含大陆碎屑很少或没有，因而水透明度大，呈深蓝色；海水化学组成比较稳定，盐度普遍较高，所含养分远比沿岸区为低，因此生物种类和种群密度都比较贫乏。这一区的环境终年恒定，只有极少数深海动物生活在深海的水层下面，没有任何植物生长。

海洋环境污染的研究，已经引起了世界各国的重视，重点是集中在沿岸水域，尤其是港口及河口。污染程度比较严重，受到

特别注意的是波罗的海、地中海的部分水域，以及美、日、英、西德等国的一些内湾、海港和河口。污染的一般象征是溶解氧降低和硫化氢出现，透明度下降，“赤潮”连续发生，生物组成的变化（趋向简单化或种类更替），生物体内污染物质的含量增高。海洋污染最终给人类带来了影响，一方面危及人体健康，一方面破坏或影响生产活动，是经济上遭受重大损失。

（三）陆地生态系统

在陆地上，植物群落的类型多种多样，根据生物组成成分可分为森林、草原、冻原、荒漠等生态系统类型或生物群落。每一生物群落都有一定特殊形式的植被和一种相联系的动物区系，以及这一群落所适应的特殊环境条件。

由于气候条件不同，因而决定了它们分布也不同，从植被分布来看，其水平地带性为：（1）植被分布的纬度地带性是：从南到北为热带雨林——亚热带常绿阔叶林——温带落叶阔叶林——寒带针叶林——极地苔原。（2）植被分布的经度地带性是：从沿海到内陆，我国由东到西，依次分布着森林区、半干旱草原区和干旱荒漠区。从植物垂直分布的地带性来看，对山地而言，由于垂直高度改变，从山麓到山顶气温逐渐降低（海拔每升高100米，气温降低 $0.5\sim 0.6^{\circ}\text{C}$ ）。植被也随之发生相应改变。此称为垂直带。一般高山由下向上可分成森林带、灌木带、草甸带，在高山上还有苔原带，雪线以上则终年积雪。当然，不同地区这种垂直带也有所不同。

六、系统分析在环境污染生态学中的应用研究

生态系统是一个由生物群落及其理化环境所构成的复杂系统。例如一个湖泊便是一个自然的生态系统。对于一个系统的动态关系和功能，单靠直接观察是无法了解其详细情况的。为了深入研究和认识生态系统的全部过程，及时指出某一地区的污染现状和污染物对生态系统各成分的影响，为预测预报和采取预防措施，恢复提高生产力提出依据，应用数学方法和电子计算机技术对生态系统进行系统分析，最后建立一个数学模式来模仿这个系

统，进行模拟试验，已成为研究生态系统的有效途径。

（一）什么是系统分析

把任何一个系统的理化的或生物的概念，“译制”成一套数学关系的程序，以及由此得出的数学系统的操纵，称为系统分析。这个数学系统，称为一个数学模式。把系统分析方法应用到生态学，称为系统生态学。所谓生态模式（或模式生态系）的研究，就是生态系统的数学模拟试验。

苏联进行过达尔奈湖整个生态系数学模拟的初步研究。

数学模式是真实世界的一个不完善的和抽象的代表，或者是真实系统的结构和功能的抽象写照，它可以描述和预测生态系统的行为，是目前深入研究生态系统的一个极有力的工具。

数学模式具有以下四项要素：

（1）系统变量，是成套的数值，用来代表系统在任何时间的状态，即系统的每个“构件”状态，常用一项或几项系统变量来表示。

（2）转移函数或称函数关系方程式，用来表示“构件”之间的“流”或相互作用。

（3）系统的输入用外力作用函数的方程式来表示。

（4）数学方程式的常量，也就是参数。

目前，研制模型的途径，在生态学模型中可分两大类。一类是框室系统研究途径，着重于生态系的“框室”里的能量或物质的量。框室模型常用较简单的微分方程系统来表达。另一类是实验构件研究途径，着重于生态学过程（如捕食、竞争等）的详细分析，这类模型的注意力，集中于相互作用和系统方程式。

在大规模的整个生态系的综合研究中，这两类方法是结合使用的。

（二）系统分析的应用

系统分析和数学模式，用于阐明和解决环境污染方面的问题，只有十多年的历史，它是解决问题的一种方法，着眼于整个问题或整个系统，以便把各种方案进行量的确定，并作出评价。

而不是集中注意个别的组成部分。因此，所有的数学模拟和计算技术，本身并不能解决环境污染问题，而只是增加了提供污染情报的能力。

水污染控制方面的系统分析和数学模型的研究发展比较快，例如，美国把湖泊的模拟研究作为最紧迫的问题之一，目前正在进行中。挪威水研究所已研究制作了水处理厂模型，污泥处理厂模型等。另外，美国正在研究酸雨对森林生态系统的影响，试图建立酸雨对森林生态系统影响的模式，提出酸雨对生态系影响的空气质量标准。

第二章 环境污染的生态作用

随着人类对自然资源的不断开发和工农业生产的迅速发展，大量的有害物质不断地进入到水、气和土壤环境中，导致生态环境发生一系列的变化，环境受到污染，生物和人受到危害，水、陆生态系统的动态平衡遭到破坏。因此，由于环境污染而产生的生态学问题就更加突出。为了有效地解决这一问题，必须对各类污染环境中的生态系统进行分析研究，了解各种污染物质对其结构、功能的影响，阐明其作用机制，以便采取必要的措施和对策。

环境污染的生态作用，主要表现在污染环境对生物及整个生态系统的影响，最后危及到整个人类生活环境，这是目前世界各国都在注重研究的重大环境保护课题之一。

一、大气污染的生物反应

大气污染使生态环境发生了强烈的变化，植物随之产生各种反应。根据是否出现可见症状，常分为“可见”和“不可见”两种反应。可见反应又因大气污染浓度不同，而分为急性中毒和慢性中毒，这两种中毒并无严格的定义。急性中毒是在较大浓度下，植物在几分钟至几十小时内出现中毒症状，如叶片出现水浸状斑点，叶缘卷曲，叶尖干枯，或局部组织坏死。慢性中毒是指植物长时间暴露在低浓度污染物的环境中，由于局部组织长时间积累

了中毒物质，导致局部组织坏死，或产生缺绿变色等症状。

总之，大气污染可以使植物受到各种伤害，其危害程度因污染气体流向、毒物种类和浓度、植物种类等不同而有所差异。

(一) 高等植物叶片构造

高等植物通常都有根、茎和叶，这些器官生理机能分工的结果，产生了维管系统，以适应其生命活动的需要。植物对大气环境污染的反应和保护作用主要表现在叶子上，因此有必要对叶子的基本构造和特征作一简单介绍。

叶片是叶的主要组成部分，是植物蒸腾作用和光合作用的主要器官。由于植物种类和环境条件的不同，叶片的构造也不尽相同。植物叶片的构造一般可分为表皮、叶肉组织和维管束三部分（图1-2-1）。

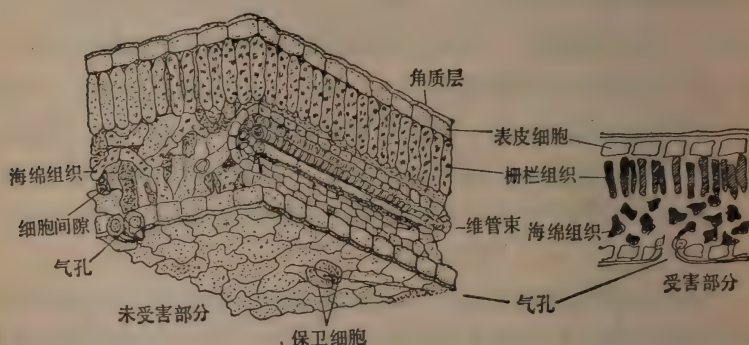


图 1-2-1 植物叶片横切面构造及其受害状况

1. 表皮

表皮有上下之分，通常由一层生活的扁平细胞组成，形状多不规则，侧壁凹凸不平，彼此紧密嵌合，外壁增厚并具有角质层。表皮除保卫细胞外，一般不含叶绿体。气孔多分布在下表皮，但一些浮水叶片气孔却仅见于上表皮。

2. 叶肉

叶肉是由同化组织组成。靠近上表皮的一层或几层含有较多

叶绿体的长柱形细胞，与表皮垂直排列，在横切面上呈栅栏状，叫做栅栏组织。位于栅栏组织和下表皮之间的细胞，其形状不规则，含叶绿体较少，细胞间隙较大，呈海绵状，叫做海绵组织。一般在气孔内方的海绵组织间隙较大，构成孔下室。所以叶肉组织不但是光合作用的主要场所，而且也是一个通气系统。

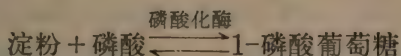
3. 维管束

叶中的维管束，就是在叶面上看到的叶脉，它通过叶柄与茎中的维管系统相连，因此有木质部和韧皮部，且木质部位于韧皮部上方。

4. 气孔及其调节

气孔是由两个肾脏形的保卫细胞形成的。保卫细胞内含有叶绿体，近气孔一面的细胞壁厚。当保卫细胞的渗透压增高时，细胞吸水膨胀，因靠近表皮细胞的细胞壁薄，膨胀程度大，因而细胞向内弯曲，气孔张开；反之，细胞失水时，体积减小，细胞壁伸直，气孔关闭。可见气孔的开关，主要决定于保卫细胞的膨压大小。

气孔是植物与大气进行气体交换的通道，有害气体通常都从这一通道进入植物体内，因此气孔的开关状况直接与有害气体的进入和吸收有关。影响气孔开关的因素很多，但光是影响植物气孔开关和生理活动的主要调节者，特别是光对保卫细胞中淀粉转化为糖类起着重要作用。在磷酸化酶的作用下，淀粉和糖类转化是一个可逆反应：



这一点对于气孔保卫细胞渗透压的调节有重要作用。因此，气孔一般白天张开，夜间关闭，这就是植物夜间抗性要比白天强的缘故。

(二) 有害气体对植物的危害

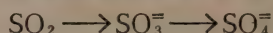
早在上一世纪末期，在欧美一些国家就发现，大气污染不仅对人体健康有严重威胁，对植物也有很大危害。从城市工矿区散

发的二氧化硫、氟化氢、臭氧等有害气体，常常使附近的农作物、蔬菜减产，使果树、森林、城市绿化树木受到损害。

国外对有害气体研究比较多的，还是二氧化硫，氟化物及光化学烟雾（主要有害成分是臭氧，二氧化氮及过氧乙酰硝酸酯）。这些气体危害植物以后，在叶子上都会出现明显的伤害症状。根据这些症状特点可以鉴别有毒气体的种类。近年法国、美国、日本等都出版了专门的彩色图谱，提供了各种植物受害症状照片，有较大的参考价值。几种有害气体对植物的急性危害症状的主要特点如下：

1. 二氧化硫

二氧化硫是一种损害植物的主要气体物质。植物中少量的硫是植物生长所需要的。然而高浓度的硫则引起外渗或原生质分离。二氧化硫通过气孔进入叶子后，被叶肉吸收，转变为亚硫酸盐离子（ SO_3^- ），然后又变成硫酸盐离子（ SO_4^- ）：



由于在植物体内 SO_2 变成亚硫酸离子的速度要比亚硫酸离子变成硫酸离子快的多，所以高浓度的二氧化硫进入植物体内，会造成高浓度亚硫酸离子的积累，一般 SO_3^- 对植物的毒性比 SO_4^- 高 30 倍，所以高浓度的 SO_3^- 使植物受到损害。因此 SO_2 使植物中毒是由于 SO_2 的还原作用，而不是由于酸性所引起的。

进入植物体的 SO_2 大部分以硫酸盐及亚硫酸盐等形式积累在叶子内，然后陆续把它们的一部分转化为正常的代谢产物，如用 $^{35}\text{SO}_2$ 示踪实验表明， SO_2 中的 S，可以进入植物的含硫氨基酸和蛋白质及其它含硫有机化合物中。对一种植物来说，这种转化率愈高，则吸收 SO_2 的能力愈强，该种植物净化大气的能力也就愈强。一般来说，吸收和同化能力都很强的植物净化效果最好。

在 SO_2 的作用下，对植物的影响主要表现在以下几个方面：

（1）气孔的机能瘫痪：高浓度的 SO_2 可导致植物气孔开启和关闭的机能瘫痪。由此而引起的结果是：1） SO_2 大量进入植物的细胞内加重其危害；2）是水份不断的大量蒸腾，从而导

致植物组织迅速枯萎。Unsworth及其同事曾发现, SO_2 浓度在 $0.1 \sim 0.5 \text{ ppm}$ 范围时, 能促进气孔张开, 但有人报导说, 这种情况只是在相对湿度大于 80% 时出现, 湿度低时, 反而引起气孔关闭。

(2) 叶片组织结构破坏: SO_2 通过开放的气孔进入叶片组织后, 溶解在细胞中, 致使细胞内含物破坏或变形, 引起外渗和原生质分离, 使叶片组织结构发生变化, 海绵组织比栅状组织表现更为严重, 一般来说, 都表现为细胞失水变形; 组织破碎, 栅状组织细胞的排列层次紊乱; 细胞间隙增大, 叶片明显变薄; 细胞内产生质壁分离等。

(3) 植物的新陈代谢受到干扰: 一般光合作用受到抑制, 叶绿素失去镁离子, 去镁叶绿素的含量增高; 从苜蓿的实验中观察到总的蛋白质含量下降, 及蛋白质的易消化性衰退; 在土豆试验中也观察到块茎中的淀粉、糖及维生素含量均出现反常现象; 此外 SO_2 对氨基酸代谢也有影响, 谷氨酸含量降低, 而谷氨酰胺含量增加。

二氧化硫使叶子的受害伤斑多半出现在叶脉间, 成点状或块状。单子叶植物的伤斑呈棕黄色, 自叶尖向下成条状分布。这种急性损害浓度约为 0.03 ppm ; 针叶树往往自尖端开始向下逐渐发黄枯焦。在极低浓度的 SO_2 时, 则出现慢性损害, 一般是在叶子上呈现出棕红色或白色斑点。

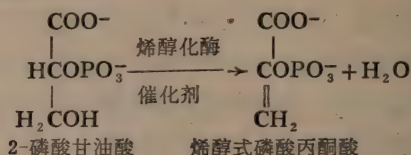
从植物的敏感性和抗性来看, 紫花苜蓿、大麦、棉花、小麦和苹果树对 SO_2 的危害最为敏感; 马铃薯、洋葱、玉蜀黍、女贞和枫树对 SO_2 抵抗力最强。

2. 氟化物

氟是卤素中化学性质最活泼的元素, 因而生物容易受到它的危害。被污染大气中的氟化物以氟化氢、四氟化硅等, 对植物的毒性最强烈。

氟化氢被植物叶面吸收后, 主要经由薄壁细胞间隙到达导管。导管里若有胶状硅酸存在, 则污染物质就和它一边起反应,

一边随蒸腾流到达叶端和叶缘。由于卤素的特异活泼性，使各种酶和叶绿素遭到损害。氟的这种毒害作用是：光合作用长时间地受到抑制，或使磷酸化酶、烯醇化酶和淀粉酶等钝化。有的资料指出烯醇化酶（enzyme enolase）似乎受污染物的影响最大。这种酶控制下列反应。



像水稻和麦类那样的含硅酸植物，由于硅氟结合，形成难溶性的硅氟化合物；大豆和油菜那样的含钙植物，由于钙氟结合，形成难溶性的钙氟化合物。可以推测它们都积累在受害的局部，大部分积累在叶子中，向其它部分转移很少，这一点已从示踪原子试验得到证实。

氟化氢对植物叶子的损害首先出现在尖端和边缘，通常受害部分呈棕黄色，成带状或环带状，逐渐向中间扩展。当受害严重时，由于细胞枯死，而出现枯斑病。

各种植物对氟的忍耐力有很大的差异。对氟化氢比较敏感的植物是唐菖蒲、杏、李、梅和某些柑桔类，以及荞麦、玉米、蕃茄等作物；相反，榆树、梨树、苹果树、紫花苜蓿和玫瑰以及棉花、豆类植物和菠菜等，对氟化物则有较强的抵抗力。

3. 光化学烟雾

总的来说，光化学烟雾对植物的损害，表现为受害叶片背面变为银白色或古铜色，叶片正面受害部分与正常部分之间有一明显横带。但光化学烟雾中一些主要成分的作用机理和毒害病状也有所差异。

（1）臭氧：臭氧进入气孔损害叶子的栅栏组织，即使在夜间气孔关闭时，它也可以进入植物体内。臭氧主要使栅栏组织细胞壁和表皮细胞破坏，在叶片表面呈现出红棕色或漂白色的斑点，而导致植物枯死。臭氧可使葡萄糖氧化，所以含糖多的植物

对它的抵抗能力较差；由于它是强氧化剂，可与原生质膜发生作用，提高了膜的透性，使细胞释放二氧化碳的速度加快，导致呼吸速率提高；臭氧还可以破坏植物光化学活性的能量流，使正常的光合作用电子传递受阻。

对臭氧最敏感的植物是烟草、蕃茄、豌豆、菠菜、马铃薯和燕麦；抗臭氧的植物有薄荷、天竺葵和胡椒等。

(2) PAN (peroxyacetyl nitrate, 过氧乙酰硝酸酯): PAN通过气孔进入叶内，使之收缩、失水，然后充以空气，这种危害可以贯穿整个叶子。如果植物先不暴露于光下，PAN一般不会造成损害。

PAN 损害植物的表现症状是：在叶子下面出现大面积的透明的银白色或青铜色的病斑区域。

一般对 PAN 比较敏感的植物是牵牛花、莴苣菜；卷心菜、玉蜀黍、小麦和紫罗兰等对 PAN 则有较强的抵抗力。

(3) 二氧化氮：这种气体损害植物的方式与二氧化硫相似。一般超过0.5ppm 浓度时就妨碍生长，在1.0ppm 时，就引起急性毒害。

除上述有毒气体污染物外，还有碳氢化合物气体、硫化氢等，在此不一一列举。

另外，一些微粒型的大气污染物，如灰尘、煤灰等，也可以在叶子上蒙上一层，使保卫细胞和气孔内积满了这些污染物，结果会使通道堵塞，妨碍气体交换、光合作用和呼吸作用。

(三) 有害气体对植物生长发育的影响

1. 植物的生理变化

有人研究指出，二氧化硫进入植物体后，引起一系列生理变化：(1) 叶子水份含量急剧减少；(2) 叶绿素中的叶绿素A比B明显减少，A/B值变小；(3) 非还原糖减少；(4) 氨基酸总量减少，特别是谷氨酸和天冬酰胺减少更明显；(5) 开始接触气体时，蒸腾量急剧增加，使叶面开始出现伤斑时蒸腾继续增加，而当伤斑面积扩大到整个叶面积的1/3以上时，蒸腾量又迅速减

少；(6)接触气体的初期，呼吸量迅速增加，随着伤斑的发生和扩大，而又迅速减少。

2. 对生长结实的影响

植物受害后，由于叶肉组织遭到破坏，正常的生理机能减退，因而使植物的生长减弱，结实量减少，而且质量变劣。根据实验，二氧化硫对植物的生长结实产生明显的影响。例如日本的一个林业试验场，将榉树幼苗分别栽于二氧化硫污染区及非污染区进行比较，经过三个月进行称重，在非污染区的植株平均重9.7克，而在污染区生长的仅重2.5克。又如苹果、李、桃等果树受二氧化硫影响后，不仅生长减弱，而且结实率大减，果实也比正常的小，产量明显降低。

氟化氢危害植物后，也会影响植物生长和结实。如某些磷肥厂附近的苹果和梨，因经常受氟化氢的危害，不少植株逐渐死亡或失去结实能力，Brewer 用1ppb的氟化氢对三年生甜橙处理26个月，与对照相比，生长量和果实产量都大大降低（表1-2-1）。

表 1-2-1 氟化氢气体对甜橙生长结实的影响

类 别	处 理	对 照	备 注
地上部总重 (公斤)	18.4	22.1	鲜 重
果实产量 (公斤)	8.6	22.8	鲜 重
叶中含氟量 (ppm)	118.0	2.0	干 重

3. 对花粉和种子萌发的影响

如梨树经5ppm的二氧化硫毒害后，明显地影响其花粉的萌发和花粉管的伸长，从而影响到正常的受粉和受精，在二氧化硫污染区收集的女贞种子与非污染区的种子相比较，不仅籽粒显著减小，饱满度较差，而且播种后发芽率明显降低。

二、大气影响植物受害的因素

植物受污染大气危害的程度，是受多种因素影响的。大气污染物的浓度、接触时间和植物本身的抗性等是影响受害的主要因

素；环境因素等由于影响植物的生理活动状况，因而也影响到植物对有害气体的抗性。

1. 有害气体浓度和接触时间的影响

环境中的污染物能引起植物产生可见症状的最低浓度，被称为受伤阈值，它常随植物种类和暴露时间而异。Heggstad 等（1971年）总结的不同敏感度的植物在二氧化硫中暴露0.5~8小时产生可见症状的阈值浓度（表1-2-2），说明随着暴露时间的延长阈值浓度逐渐降低。

表 1-2-2 不同敏感植物产生受害的阈值浓度 (ppm)

暴露时间 (小时)	敏 感	中 害	抗 性
0.5	1.0~5.0	4.0~12	≥ 10
1.0	0.5~4.0	3.0~10	≥ 8
2.0	0.25~3.0	2.0~7.5	≥ 6
4.0	0.1~2.0	1.0~5	≥ 4
8.0	0.05~1.0	0.5~2.5	≥ 2

有人把有害气体与植物接触的平均浓度 (ppb, 即十亿分之一) 和累计接触时间 (小时) 的乘积叫做暴露系数。同一植物种的暴露系数几乎是一定的。一般来说, 有害气体浓度越高出现受害迹象所需的时间就越短。很多试验表明, 气体的浓度比接触时间更为重要。

各种气体对植物造成危害的浓度和时间如下:

(1) 二氧化硫: 在人工控制条件下, 敏感植物在0.1~0.3 ppm 可产生慢性危害, 在0.3~0.5 ppm 可出现急性症状。有的0.01 ppm时就出现轻度症状。

根据江苏省植物研究所 (1977年) 等的资料可将二氧化硫的危害浓度归纳如下表 (表1-2-3)。

(2) 氟化氢: 一般1~10 ppb 连续接触数天至数十天, 即能使植物受害。如10 ppb接触20小时, 能使唐菖蒲受害, 5 ppb 接触7~9天, 能使葡萄、樱桃、杏、李等受害。

表 1-2-3 SO₂的浓度与危害症状

气 体 浓 度 (ppm)	影 响
0.3 以下	大多数植物短间接触不受影响, 少数植物 (如赤松) 在 0.2 ppm中100小时以上可出现轻微症状
0.4	敏感的植物 (如苜蓿、荞麦等) 在 7 小时内出现受害
0.5	一般植物可能发生危害、蕃茄在 6 小时内受害, 树木在 100 小时以上受害
0.8~1	菠菜 3 小时内受害。树木在数十小时内受害
2~3	许多植物在 5~15 小时内出现症状
5	某些树木在1~8小时内出现症状
6~7	某些抗性强的植物在24小时内受害
10	许多植物可能发生急剧性的危害
20	各种作物, 蔬菜发生严重急性危害, 明显减产, 大部树叶枯卷脱落
30~40	接触数分钟至数十分钟便能使作物, 蔬菜严重减产, 树木急性受害
70~100	植物受害十分严重, 逐渐全株枯死
100 以上	各种植物在短期内死亡

(3) 臭氧: 一般在0.05~0.12ppm, 接触2~4小时能使大多数敏感植物受害。如苜蓿、菠菜、三叶草、燕麦、萝卜, 玉米和大豆等接触0.1~0.12ppm二小时出现症状。

(4) 二氧化氮: 敏感的种类如菜豆、番茄、黄瓜等在6ppm中接触 2 小时即可受害。

2. 植物的发育状态

植物在不同的发育期间对有害气体的敏感性和危害状况有很大差异, 如温州密桔在开花时期受 3ppmSO₂影响6小时便产生伤害症状; 在果实成熟期受5ppm影响24小时才产生症状; 而在2~3 月间发芽前受60~80ppm的高浓度影响6小时也不产生症状。又如江苏省植物研究所曾对水稻、小麦进行 SO₂在不同生育期进行熏气处理。结果证明在分蘖期受害后易恢复, 影响产量较小。拔节期受害减产比较严重, 抽穗扬花期受害减产最为严重; 到灌浆期受害影响产量又比较轻, 成熟期受害对产量的影响最小。

一些研究者还指出，在作物的生长发育期间，有几个“关键”时期，植物对有害物质的危害敏感影响也大。如禾本科作物的“关键”时期有两个：第一个是在三叶期；第二个是从抽穗前不久开始到种子黄熟为止。若在这一发育时期遭受 SO_2 毒害，则将导致作物的抽穗期推迟。当 SO_2 的侵袭发生在开花期间，则其危害将达到顶峰。例如，测定在此发育期间受害燕麦的种子的千粒重时，发现比未受害的收获量减少30%；若 SO_2 的侵袭发生在六叶期之前或乳汁管成熟期之后，则最严重的危害作用也只有15%。开花期最关键的时刻是柱头上花粉正在萌发阶段， SO_2 将阻止花粉的正常萌发，因而使受粉率下降，而最终导致收获的数量和质量下降。

在一般情况下，单子叶植物是最幼嫩的叶子首先遭受伤害，而双子叶植物则是生长发育最完全的叶子最为敏感。

不同年龄的实生苗对气体的抗性也有区别，一般抗性随树龄增长而增强（表1-2-4）。

表 1-2-4 实生苗年龄与对 SO_2 抗性的关系⁽⁴⁾

实生苗 年 龄	叶 片 受 害 面 积 (%)				
	女 贞	无 患 子	薄壳山核桃	拐 枣	枳 橙
当年生	70	85	95	70	10
2年生	30	40	30	40	0

3. 植物本身的抗性

各种植物对有害物质的抗性是不同的，因而在浓度和作用时间相同的情况下，其危害程度因种而异。根据各种植物对某种有害物质抗性的大小，可将植物区分为强、中、弱三类。多数植物对多种气体在抗性上有很大的一致性，表现出均强或均弱。亦有部分植物种表现出对不同有害气体在抗性上有所不同，这种一致性，主要取决于植物本身形态结构和生理特性。一般来说，凡叶面蜡质层厚，角质化强的种类抗性较强，危害较轻（如女贞、海桐、

茶花等)。这一问题将在植物抗性一节详述。

4. 植物受害与叶片构造的关系

据广东省植物研究所等(1978年)的资料^[13], 大多数植物在毒气影响下, 自叶片下表皮开始出现症状说明由气孔吸入毒气, 使内部受害为主。他们用显微镜观察到多数抗性较强的种类, 其叶片单位面积上的气孔数目少。如印度榕、垂叶榕、高山榕、洒金榕等, 每平方毫米叶面积上的气孔数, 分别为20.7个、23.9个、28.5个、24.4个; 而抗性弱的华南朴、厚壳、福建茶, 其气孔分别为: 100.9个、65.4个、67.3个。而且发现在毒气条件下, 不同植物种类的叶片气孔开放程度也不同, 多数叶片受害级别为零级的, 气孔多处于关闭或开放小的状态。受害级别为Ⅲ级的种类, 气孔大多数是中等的开放程度。

5. 环境条件的影响

有害气体对植物的危害, 主要是通过气孔进入植物的同化器官产生的, 而气孔的开放和关闭是受环境条件制约的, 因此, 一切有利于气孔张开的因素都能起到增加植物遭受伤害的作用。如较强的光照、适宜的温度、良好的供水条件及空气湿度、充足的土壤肥力、较高的 CO_2 浓度等都能引起细胞的膨胀, 导致气孔开放, 增强气体交换; 而干旱、寒冷、高温、强光和黑暗的作用则相反。

一般来说, 温度升高, 植物对有害气体的敏感性随之增强, 处于 5°C 以下时抗性最强。湿度有利于气孔的开张, 因此也容易受害。例如用0.75ppm二氧化硫处理苜蓿, 相对湿度超过80%时2小时15分钟产生危害; 60~80%时5小时后危害; 40~60%时11小时才受危害。

有人观察到 SO_2 的毒性在白天比夜间约大4倍; 有的试验表明, 光照强度在3000烛光时是植物敏感性之最大光强度, 低于此限度时, 植物的抗性明显增加, 超过此限度敏感性变化不大。

土壤水分下降, 抗性增加, 通常轻微的凋萎可使植物具有最大的抗性。土壤含氮过多, 缺氮或营养不良, 都会使氟化氢的危

害加重，敏感性增强，而适量的氮肥却能提高植物对二氧化硫的抗性。

也有人研究表明，IAA（吲哚乙酸）能促进氟的吸收，浓度越高，吸收的氟越多，因此认为氟进入叶组织是受着这种激素的控制。

6. 有害气体的复合作用

近年来国内外较多地进行了气体的复合危害试验，发现两种或两种以上的有害气体混合起来危害较大，例如二氧化硫+臭氧、二氧化硫+二氧化氮、二氧化硫+氟化氢等混合使用后都要比单一气体（浓度相同）的危害重得多。

三、水体污染对生物的影响

这方面主要包括水质污染对植物、动物和微生物的影响。

1. 对植物的影响

污水中某些毒物达到一定浓度后，接触植物，会使根部腐烂，全株枯黄而死亡。对水稻等一些水生、沼生植物（如菱、藕、水浮莲等）危害更为严重。今以工业废水中的酚、氰、砷等有害物质为例分述如下：

（1）酚对植物生长的影响：据北京市农业科学研究所环境保护研究组等的试验，以不同浓度的酚溶液浇灌水稻、小麦、玉米、黄瓜等植物，获得如下结果。

水稻：当含酚量在25毫克/升以下时，为水稻生长的适应浓度；从50毫克/升开始，为其生长的抑制浓度，种子的发芽势弱，生长受抑制，产量下降9.9~27.6%；从200毫克/升开始，为水稻生长的危害浓度，生育期延迟，植株矮小，根系发黑，千粒重和产量显著下降（减产38.6%），当含酚量在800毫克/升以上时，则为水稻的致死浓度，叶色变灰，植株不长，呈萎蔫状态，根系发黑，逐渐枯死。水稻对酚的敏感期是苗期至分蘖期。随着生长发育进展，植株对酚的忍耐能力有明显的提高。

小麦、玉米：对酚类化合物不敏感，忍耐能力较高，一般在含酚量200毫克/升以下对它们生长发育及产量影响不大。

黄瓜：含酚量在100毫克/升时为生长的抑制浓度，产量有所下降；从200毫克/升开始，为黄瓜生长的危害浓度；而800毫克/升时，植株显著矮化。

有的试验用浓度0.5和50ppm的苯酚灌溉土培水稻，都有不同程度的促进作用，水稻植株生长较高，稻谷千粒重增加，而用浓度500ppm苯酚灌溉，对水稻却产生了抑制作用，植株高度下降，秕谷率增加。

上述资料表明低浓度含酚废水灌溉小麦、水稻、玉米等均有促进作用，只有含酚过高的废水才使作物生长受到影响，特别是农作物的发芽和幼苗期更易受害。这是因为当酚进入植物以后，大多和其他化学物质形成复杂的化合物，能促进根系的形成和生长，加速生长点的分化，提高植物细胞膜的渗透性，因而有促进作用；而高浓度的苯酚，破坏了细胞的渗透性，会使植物变色变形，抑制了植物的生长。

北京市农业科学研究所环境保护研究组的试验表明，以不同浓度酚灌溉后，水稻和黄瓜的食用部分酚类化合物明显增加（表1-2-5）。

表 1-2-5 酚的灌溉剂量和农产品中酚的残留量的关系

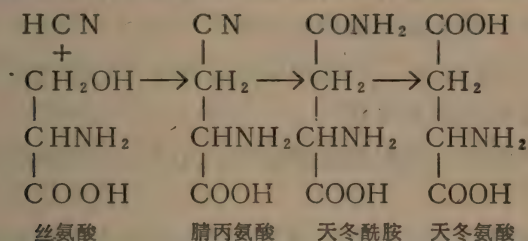
（单位：毫克/公斤）

酚灌溉剂量 (毫克/升)	黄 瓜			糙 米		
	总 酚	游 离 酚	结 合 酚	总 酚	游 离 酚	结 合 酚
0	2.60	0.41	2.19	24.80	2.04	22.76
0.13~0.50	3.20	0.70	2.50	28.40	2.30	26.10
1.00	2.60	0.46	2.14	27.60	2.68	24.92
5.00	2.60	0.47	2.13	30.60	2.80	27.80
25.00	2.90	0.64	2.26	33.80	2.90	30.90
50.00	4.54	2.06	2.48	35.80	7.52	28.28
100.00	7.82	4.46	3.36	50.80	16.00	34.80
200.00	15.20	11.30	3.90	58.00	25.60	32.40

（2）氰化物对植物生长的影响：根据中国科学院植物研究

所二室等单位(1979年)的研究结果,当灌溉水中氰的浓度在1毫克/升以下,小麦、水稻生长发育正常。浓度在0.5毫克/升时,对作物生长有一定刺激作用,产量有所增加。浓度为10毫克/升时,水稻开始受害,产量为对照的78.6%,小麦受害不甚明显。浓度为50毫克/升时,小麦、水稻都明显受害,但水稻受害更为严重,产量仅为对照的34.7%;小麦产量为对照的63%。水培时,氰含量为1毫克/升时,水稻生长开始受到影响,浓度为10毫克/升时,水稻生长明显受抑制,产量比对照低50%;50毫克/升时,大部分受害致死,少数残存植株,已不能结实,这说明,因为没有土壤诸因子的影响,水培作物更易受害。

氰对作物的影响与其在体内的代谢有关,氰化物是植物自身的代谢产物之一,因而少量的氰有调节代谢的作用。许多研究指出氰能抑制多种金属酶的活性,如细胞色素氧化酶最敏感,过氧化氢酶和各种氧化酶亦很敏感。有的试验证明氢氰酸对光合作用有强烈的抑制作用,引起叶和根的死亡,这些结果都说明氰有抑制植物生理活动的作用,因而导致植物受害。但由于氢氰酸在植物组织中常以结合形态存在,并在释放后很快挥发。如有的与糖结合而存在,在某些酶的作用下分解,氢氰酸被释放出来;Tshiersch (1965年)用 ^{14}CN 研究证明,在植物体内氰与丝氨酸结合生成腈丙氨酸,并依次转化为天冬酰胺和天冬氨酸。其反应如下:



由此可见,外源氰对植物有抑制和毒害作用,但随着氰化物逐渐被同化而解除,所以在一定剂量范围内,不会造成对植物的毒害。然而氰浓度超过植物本身代谢能力时,就会对植物生命活动产生抑制作用,使植物正常生长受到阻碍。

(3) 砷对植物的影响：以 10 毫克/升砷溶液浇灌水稻，叶子失水内卷，逐渐枯萎退绿，生长受抑制，产量明显下降。玉米在同样浓度下也不能正常结实。

2. 对水生生物的影响

当水体被污染以后，可以明显看到在污水中原生动物大量出现。如草履虫、变形虫和眼虫一类的自由游泳性原生动物等。在流速大的河川中、还有钟虫，独缩虫，累枝虫等有柄纤毛虫类。污染水域内常见的大型无脊椎动物有颤蚓、摇蚊幼虫、水蛭、栉水虱等，其中以颤蚓耐污性最高。另外也有一些蓝藻和绿藻类繁茂生育。但有机废水排入河流，由于其大量消耗了水中溶解氧，不仅形成缺氧环境，而且由于腐败、发酵、产生甲烷， H_2S 和硫酸等有毒物质，严重的影响鱼类和其他水生生物的正常生活。

对生物有毒害的重金属盐类，即使排入水体中的浓度很低，也可通过食物链在生物体内累积，如日本的水俣病，就是由于废水中含有甲基汞引起的。据调查在发病区，水中甲基汞含量只有 $0.1 \sim 0.01 \text{ppb}$ 。而鱼类摄入了这种废水，可在体内浓缩 $100 \sim 500$ 倍。按湿重计算，鱼体内可高达 $10 \sim 30 \text{ppm}$ 。捕食鱼类的一些海鸟，也可因此而受其害。一些放射性物质污染水体之后，同样可以通过食物链进行浓缩，危害生物。

海水中的污染物质，种类之多，不胜枚举，而石油是海水污染中数量最多，危害范围最广的一种。

石油进入海洋以后，对海洋生物危害十分严重，往往可以引起以下几个方面的生物效应。

(1) 油膜覆盖海面会造成生物窒息作用，使海洋生物因缺氧而死亡。

(2) 在海浪等因素的作用下，乳化油比水面的油膜有更大的危害性，大量的水生生物因接触中毒而死。

(3) 石油的特殊气味影响海洋生物的回游路线和浅海繁殖区，对于水生幼体生物的作用更为敏感。

(4) 破坏较高级水生生物的食物来源。

(5) 降低水生生物对传染物和外界刺激物的抵抗能力。

(6) 使水产资源的营养价值遭到破坏。

3. 对微生物的影响：在污浊的水体中，底生或腐生性细菌数量增多，如球衣细菌、贝氏硫细菌等这类丝状细菌大量繁殖，真菌中有镰刀霉、毛霉、青霉等种类，有关这方面的问题，在后面有关章节中还要详谈。

四、土壤污染对生物的影响

这里主要介绍土壤中的农药污染和微量元素对生物的影响。

1. 农药污染对生物的影响

(1) 对植物的影响：在喷撒农药的过程中，一部分农药粘附在植物体上，通过叶片组织渗入植物体内，运转到植物体的各部分，另一部分进入土壤中，又被植物根部吸收，残留在植物体及其果实种子中。

化学农药的种类很多，目前已有一千余种，从其对植物的危害来说，较为严重的主要是有机氯和含铅、砷、汞等重金属的农药和一些特异性除莠剂。

有机氯农药被植物吸收后，在体内大量地积聚，其残留量因器官不同而异。据试验，在稻田中施用6%的丙体六六六可湿粉剂1.5斤，分别在孕穗、始穗和齐穗三个不同时间使用，收获的稻米中六六六的残留量分别达到0.12ppm、0.15ppm和0.19ppm。而且每增加一次施药，稻米中的残留量就要增加0.05~0.22ppm，并发现稻壳中的六六六残留量比稻米中高六~十三倍，稻草中的残留量更高。有些作物，其食用部分在土壤中形成，如花生、土豆、白薯等，如果土壤中含有有机氯农药，也有污染的可能。据测定，种植在含七氯0.16ppm土壤中的花生，其种子中七氯的含量可高达0.67ppm，为土壤含量的4倍。

有机氯农药是一种脂溶性较强的农药，很容易通过土壤→农作物→动物→人的食物链，在一些食肉动物中逐渐积累起来，再通过人食用，在人体内富集，影响身体健康。

一些含有铅、砷、汞等重金属制剂，毒性较大，它们在土壤

中残留时间也长，其半衰期可达10~30年。如作为灭菌剂的“西力生”“赛力散”等汞制剂，对生物的毒性就比无机汞大。实验证明，水稻对“赛力散”的吸收性较强，并在体内积累。尤其在抽穗以后施用较为显著，据测定，在抽穗期施用者，其体内汞的残留量分别是：糙米中为0.99毫克/公斤，谷壳中为2.35毫克/公斤，稻草中为4.00毫克/公斤。又如有机砷农药——“稻脚青”具有一定的内吸性，故当其进入植物体后，趋于向生长旺盛的部位移动，最后大量地积累在稻穗中。

某些特异性农药，如2,4,5-T和“杀草强”除草剂，已经证实对高等动物有异常生理反应，有引起畸胎、癌症的危险，当动物经常食用超过100ppm的杀草强，可引起癌症；落叶剂在人体内积累较多时，可发生怪胎。

(2) 对土壤微生物和无脊椎动物的影响：土壤是土壤微生物和无脊椎动物的栖居和生活的场所，当土壤受到农药污染后，便会导致这些生物的种类和数量发生变化。例如除草剂——“西马净”的使用，使土壤中无脊椎动物数目降低33~50%。在使用“西马净”3~4个月后，同未施药的土壤相比较，蚯蚓、双翅目、鞘翅目幼虫和螨等，在数目上有显著减少。

(3) 对飞禽的影响：飞鸟体内农药的积累，主要是由于取食含有农药污染的作物的种子和谷物，或取食经过食物链锁与生物浓缩的鱼类和无脊椎小动物。

在过去十余年间，欧美各国曾对野生鸟类和哺乳动物体内农药残留情况进行了大规模的调查，从捕捉的1928个野生动物（其中有91种鸟）中发现68%的体内有DDT、七氯、狄氏剂，其中山鹑组织中的DDT平均值为1.7ppm，七氯氧化物为1.6ppm。农药对鸟类的危害主要是引起蛋壳变薄，从而导致繁殖率下降，结果使群体数量发生显著变化。一般来说，吃其它鸟或鱼的鸟，比吃种子和蔬菜的鸟的残留量高。

(4) 对野生动物的影响：农药对野生动物的影响主要是由于捕食了受农药污染的植物（种子、果实、茎叶等）、鱼类和鸟

类，通过食物链产生的。一般来说，农药对野生动物的污染，不象对水产、飞禽那么严重，但也有不少事例表明，已对某些野兽的生存造成了威胁，如英国在1959~1960年冬季，在用有机氯农药拌种处理的地带进行调查，发现狐狸死体多达1300头以上，对尸体进行解剖测定，体内均含有高浓度的有机氯杀虫剂。

2. 微量元素污染对植物的影响

一般情况下，土壤中的微量元素锰、铜、铁、镁、钙、锌等，含量很少，但又是植物生活所必需。当这些元素在土壤大量积聚时，会造成土壤污染，对植物的正常生活产生危害。例如铜元素，本来是植物生活所必需的微量元素之一，土壤中缺少了铜，植物就会出现病症，但当土壤中铜含量达到20毫克/公斤时，小麦就要枯死；达到250毫克/公斤时，水稻也要死亡，如在日本足尾开采铜矿时，由于大量含铜废水排放，侵入当地农田，使土壤中铜含量高达200ppm。结果在该矿区周围有40~60公里的农业区，由于土壤受铜的污染严重，使水稻生长不良，稻苗高度不超过10厘米，产量减少到只有原来产量的1/10。一般来说，农作物受铜危害的症状，主要表现在根部，抑制根的生长，减弱吸收养分的能力，因而长势不良。

3. 影响土壤污染物质危害的因素

土壤中污染物质对生物的危害不仅取决于有毒物质在土壤中的积累量，而且与土壤的环境条件有关。因为各种有毒物质进入土壤后它的存在状态和毒性大小是以土壤的环境状态为转移，也就是说受土壤中某些环境因素所制约，这些因素主要是：

(1) 土壤的气体条件：土壤中的气体条件决定土壤中的有毒物质处于氧化状态还是还原状态，在水田中，由于多水而通气性差，使土壤中空气（氧）缺乏，因而多处于还原状态。相反，在旱地土壤中，由于缺水，土壤通气性良好，一般常处于氧化状态。这种氧化还原的条件，明显地控制着土壤中有毒物质的动态，如以砷为例，砷处于氧化条件下为5价（ As^{5+} ），而在还原条件下为3价（ As^{3+} ）。从其毒性而言，以3价砷的毒性最大。

通常多量施用磷酸铝的土壤，若与水田轮作，则原来为 As^{5+} 便还原为 As^{3+} ，增强其毒性。

镉在水田条件下呈硫化镉形态，比之处于旱地条件下难为植物所吸收，因而减轻其毒性。在旱地里，镉呈离子状态，容易被植物吸收，因而在旱地里，土壤中的镉含量与植物的吸收量成正比关系，而在水田中这种关系就不明显。

农药的分解速度，在水田和旱地，往往也有很大差异。例如在旱地，六六六和DDT 甚至隔数年之后仍有残留，而在水田中，其残留药效大约只有旱地的1/10左右。

(2) 土壤中有有机质和粘粒的含量：土壤有机物质（又称土壤腐殖质）及粘粒具有较强的吸收性能，其表面容易吸附金属及有机物质，一般来说，土壤中农药残留量的倾向是：土壤越是富含有机物质，其残留量也越多。可是，这种情况与农药原来残留毒害作用程度并不成比例。与有机质结合的农药不活泼，难于移动，作为农药使用，其药效降低，就是说，即使残留的农药数量相同，从其毒性来讲，无机质土壤中的毒性要比有机质土壤大的多。在缺乏粘粒和有机质的沙土中，由于对污染物质的吸收性能差，故很快就随水下渗，从其本身来讲，对生物的毒害性较小，但却引起地下水的污染。

(3) 土壤反应：土壤反应通常以pH表示。pH 值在7 以下为酸性，7 以上为碱性。有害金属离子通常在酸性土壤中，可提高其水溶性，且容易移动，从而提高其危害性。因此，施用石灰，使土壤反应呈中性或碱性，金属离子便成为不溶解状态，于是也难于为植物所吸收，当然其危害也就减轻。

五、环境污染对生态系统的影响

(一) 污染物质对生态系统作用的特点和规律

当前环境污染是影响生态系统的一个强大因素。大量研究表明，在污染物的影响下，生态系统发生着深刻的变化，并有一定的规律性，这些变化主要是：

(1) 种类组成的变化：在污染物的作用下，耐污染种类保

留，不耐污染种类消失。种类组成由复杂到简单，种类数量由多到少。如在水生生态系统中，高等植物种类减少，正常的浮游植物为污水类型的藻类所代替；在陆地生态系统中，种类组成的变化表现为森林树种被灌木和草本所代替，在严重的情况下，甚至只有苔藓地衣能够生存。

(2) 个体数量的变化：在污染环境中，一般的生物种的个体数量大大减少。

(3) 系统结构的变化：即生产者和消费者的种类组成和比例发生变化；由简单配置的广泛分布种代替了复杂配置的特化种。

(4) 生态系统的养分大量损失，不稳定性大大增加。

(5) 生态系统中的生产者、消费者和分解者之间与非生物环境的关系发生改变，以及物质与能量循环的失调等等。

目前，这方面的研究重点是污染物对生态系统长期或短期的影响，污染物存在的形式，以及在生态系统中的运转途径和积累规律。研究对象一般以 O_3 、致癌物、重金属、农药为主。在陆地生态系统中，重点研究污染物质在土壤、植物、动物和人之间的迁移途径和规律。在水生生态系统中，重点研究污染物质在水质、底泥、水生生物（即各级食物链）中的转化、富集的规律。

(二) 污染物质对生态系统的影响

1. 水体富营养化对生态系统的影响

水体富营养化是指由于水中无机盐和有机物的大量增加，使水生生物迅速增多的现象。一般来说，在自然情况下，这一过程是很缓慢地发生，而在人类活动的作用下，可以加速这一过程的进行。富营养化现象在湖泊中表现的最为突出。

在湖泊演化过程中，富营养化起着重要作用，随着富营养化过程进展，则湖泊由贫营养湖→富营养湖→沼泽→干地，如图1-2-2所示。

富营养化作用的产生与水体中氮和磷的含量有密切的关系，一般认为总磷和无机氮含量分别在20毫克/米³和300毫克/米³以

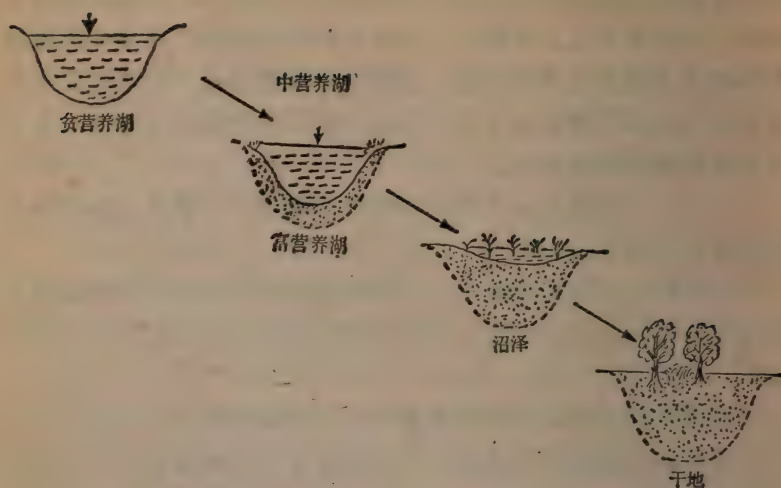


图 1-2-2 富营养化作用引起湖泊生态系统的变化

上，就可能出现富营养化。

由于湖泊中营养条件不同，生物群落随之发生变化，在富营养化过程中，促使藻类丛生，首先以窗格平板硅藻占优势，继而出现红色颤藻，它们的出现是发生富营养化的征兆，最后以浮游生物占优势。而且根据杉木昭典1974年的资料，不同湖泊中浮游生物最大密度与合成叶绿素-a的量也不同（表1-2-6）。

表 1-2-6 富营养化对浮游生物的影响

营 养 状 态	浮游生物最大密度 (厘米 ³ /米 ³)	合 成 叶 绿 素-a (毫克/米 ³)
贫 营 养 湖	1 以下	0.3~2.5
中 营 养 湖	3~5	1~15
富 营 养 湖	5~10	5~140

现以日本两种类型湖为例。

日本长野县的諏访湖，很早以前就是一个富营养湖，曾于

1918、1950、1967和1971年先后进行过四次生态学调查。结果发现：对藻类来说，在60年前这里的硅藻占优势；20年前开始蓝藻占优势；近年来微胞藻占90%。浮游动物的变迁，60年前这里剑水蚤很多；20年前和近年来以枝角类占优势，轮虫的种类和个体数增加，原生动物也有增加。该湖的富营养化不断发展，主要是沿湖兴起了许多工业，人口增加，又开展了游览事业，所以下水和粪尿排水量日益增多，其中含氮和磷较高，富营养化日趋严重，已出现了严重的公害。

相模湖，是1945年建造的人工湖，该湖进水后的五年中为贫营养湖乃至中营养湖。但后来逐渐富营养化，22年以后已成富营养湖，进水以后湖水中的氮和磷显著增加。浮游植物22年后蓝藻激增。浮游动物也有增加的趋势。

相模湖自1962年9月以来，每二、三年中，由于一种双鞭毛藻“水花”的影响，发生了多数鱼类死亡的事件。

海湾富营养化现象也十分严重，由于海洋富营养化而引起的显著现象之一是“红潮”（或赤潮）的发生。它是由于大量城市污水排入海洋，而引起水体的富营养化，促进了海面上的浮游生物急剧繁殖扩展，使海面呈现一片红色，由此称之为“红潮”。形成“红潮”的浮游生物有鞭毛藻类，硅藻类和原生动物等。这种水体富营养化，在国外已成为一个相当严重的问题。它可以引起鱼类大批死亡，在日本已成为沿岸渔业的大敌。日本濑户内海由于大量工业废水和生活污水排入，使濑户内海“红潮”愈来愈严重。在1955年以前曾发生五次“红潮”，1956年~1966年，十年内共发生39次，1966年~1970年五年间发生了35次，1971年一年内发生过136次，1973年以后每年发生200至300次。我国1975年在渤海发生过一次“红潮”，1977年8月天津附近也发生过一次。由微型双甲藻引起的“红潮”。关于“红潮”发生的原因，仍不清楚，比较普遍的看法认为是由于水的富营养化引起的。

“红潮”发生后养殖鱼、贝、藻类大量死亡的原因，说法不同，其主要有三点：

(1) 发生“红潮”时，浮游植物，微生物充塞了鱼、贝类鳃的空隙，最后引起窒息。

(2) 由于浮游植物，微生物的呼吸作用造成水中缺氧，或产生一种可溶性的毒气或毒物。

(3) 微生物使水带有粘性，影响了鱼、贝类的呼吸。

但目前大多数的解释是，认为在富营养化的水体中，由于藻类等浮游生物的大量繁殖和腐败死亡，使水的生化需氧量激增，溶解氧含量减少，致使鱼类大量死亡。

目前美国正在研究好氧生物和厌氧生物，光合作用和异养作用与氮磷循环的生态平衡规律，研究湖泊忍受氮磷的负荷量以及化学状态的变化，为制定恢复技术提供理论依据。其他如日本等国都开始注意了富营养化防治问题的研究。特别是关于磷对生态系统的影响。在这方面国外已做了大量工作。这是因为它在决定浮游生物群落的生产力上起着主要的作用。如美国用控制模拟和同位素示踪法加入 ^{32}P ，观察它的迁移，转运，研究 ^{32}P 从水到浮游生物体和从浮游生物再转运到水中的运动规律，研究 ^{32}P 进入动物，底泥和微生物的速度等等。

2. 重金属污染对生态系统的影响

由于重金属污染物在环境中不易被生物分解，且在生物体内积累转化，因此对人类会带来潜在的危害，所以重金属已成为环境科学的重要研究课题之一。

(1) 生态系统对重金属积累转化、迁移的影响：植物是生态系统的生产者，在物质与能量交换过程中起着重要作用，环境中的许多物质是通过食物链在生态系统中迁移和转化的，很多有毒物质可以通过食物链进行富集，这对人类具有重要的意义。

重金属元素及其化合物从环境中进入生态系统以后，通过生物被吸收积累，参于生态系统的物质循环。重金属在生态系统中，产生一系列的吸收、富集与分配，除化学、物理条件影响其相互转化外，生物作用（陆地生态系以植物为主）是有其特殊功能的。重金属从大气微粒或水进入土壤、植物，通过植物的新陈代

谢进行吸收，积累和分配。在不同生态系统中，由于环境，尤其是生物的作用不同，其吸收、运转、积累的规律也不同。如有人研究红树林生态系统中，红树对汞循环起了明显的作用，红树叶富含蛋白质，在其腐烂的叶子上附着了许多细菌和真菌，细菌这个分解者由此积累了汞。而且发现红树叶的丹宁含量高，则吸附汞的能力也高。这说明红树叶分解后可释放出大量的有机富集汞，其浓度高于海洋浮游植物的3~10倍。

重金属（铅、镉、锌等）在森林生态系统的分布和循环，可因森林群落的层次结构，植物种类，叶子类型（蜡质、绒毛），地被物，地上部和地下部的生物量不同，而对重金属积累和循环的作用也不同。一般积累常与每个种的生物量有关。某些种，如胡桃木，由于其有富集铅元素的特性，故体内有较高的铅含量，它的地上部分总生物量为24%，其铅的积累量约为46%。

土壤中铅对土壤生物（微生物、昆虫、蚯蚓等）的活动都有影响，蚯蚓对保持土壤物理性质，阻止土壤积累铅起着重要作用。

（2）重金属对生态系统功能的影响：重金属进入生态系统以后，引起了植物功能的变化，其中光合作用和蒸腾作用是很明显的。例如氯化铅（2.4ppm）使菠菜和西红柿叶绿粒的光合成反应明显受到抑制。有人研究，铅对大豆、玉米的影响，表明基

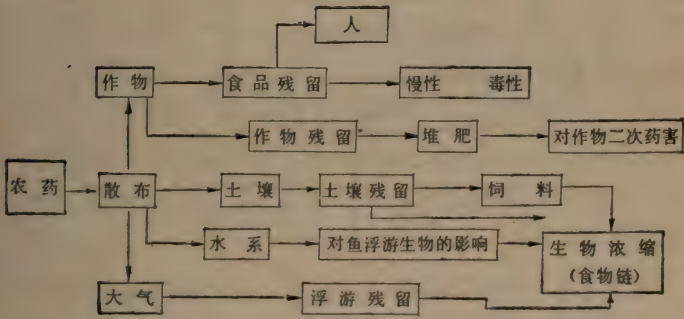


图 1-2-3 农药污染途径

质中铅的浓度增加，减少了光合和呼吸，当处理浓度低时，玉米比大豆反应更为敏感；处理浓度高时，大豆比玉米更为敏感。

3. 农药污染对生态系统的影响：在农业生产中常用的农药约有200余种。虽然它们的使用为人类带来了好处，但也产生了一些长期的、潜在性的生态影响，在整个生物圈内，甚至在极地的某些动物组织、土壤、空气和水系中，都有农药的残留。因而，这个问题已引起了世界各国的极大重视，农药在自然界的转移途径如图1-2-3。

农药在自然界的转移过程中，必然要通过食物链在生物体内逐级进行浓缩。DDT是一种有机氯杀虫剂，通过食物链在动物脂肪内大量积累。1960年5月22日~6月2日，在美国加利福尼亚

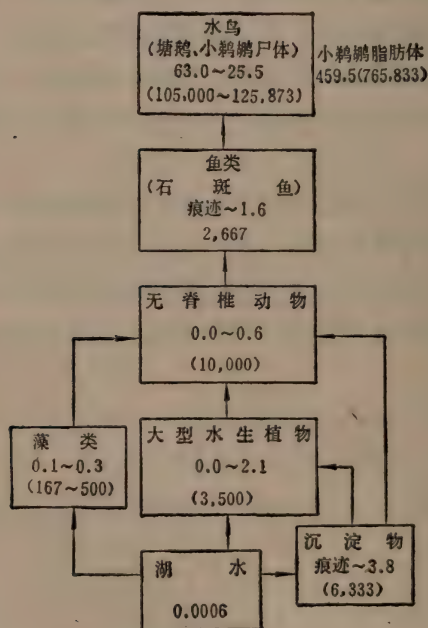


图 1-2-4 农药 (DDT) 在食物链中的生物浓缩图示⁽²⁹⁾
(数字是DDT的ppm, 痕迹表示0.1ppm以下, 括弧内为浓缩系数)

亚东北部的图利湖 (Tule) 和下克拉马斯 (Lower Klamath) 保护区, 发生鱼食性鸟类大量异常死亡, 十天内有307只鸟集体死亡。经检验小鸕鶿 (*Podiceps ruficollis Poggei*) 的脂肪体中 DDT 的浓缩竟达湖水中 DDT 含量的77万倍 (图1-2-4)。

在陆地生态系统中, 媒质不是水, 而是空气和土壤。空气是生物活动必须的氧和 CO_2 的供应源, 而土壤则固定陆地上的植物, 同时又是多数消费者和分解者的栖息场所。有机物的分解主要在土壤中进行, 细菌、丝状菌及原生动物的生物量每公顷达3.6~5.8吨, 相当于土壤中全部有机物的2~3%。人类管理的耕地, 就是生物群落非常单纯化的陆地生态系统。

在生态系统中, 由于农药的不断积累和浓缩, 必然影响系统本身的种类组成, 群体数量, 破坏其生态平衡。例如, 由于农药对环境的污染, 可使某些野生动物的大量死亡, 甚至绝迹, 这就使生态系统的本来面貌发生改变。在农业生态系统中, 由于它是由气象、地貌、植被、耕作制度、作物种类、品种、栽培技术和天敌等因素相互关联而形成的一个整体。在这个生态系中, 有一个因子的改变, 都会影响到其它因子。例如农药的使用, 抑制了病虫害, 但却造成90%以上的蚯蚓死亡。而蚯蚓数量的减少, 势必影响到土壤团粒结构的形成, 进而影响到生产者的正常机能。又如, 在使用农药过程中, 药剂在杀死害虫的同时, 也杀死了大量害虫的天敌, 从而打破了某些害虫与天敌在田间的一定均势 (如蚜虫和瓢虫之间), 改变了这一生态系的动态平衡。由于某些害虫的种类和数量的急剧增长, 使农业生产遭受严重影响。

六、环境污染对人体健康的影响

人类和其他生物一样, 都是通过食物链与周围环境不断地进行着物质和能量交换。和人有关的食物链主要有两条。一条是陆生生物食物链 (土壤→农作物→禽畜→人), 另一条是水生生物食物链 (水→浮游植物→鱼→人)。因此环境一旦发生变化, 都可以通过食物链反映到人体中。目前, 在环境致病因素中, 环境污染已占有重要位置, 下边主要介绍环境污染物对人体健康的影响。

响。

(一) 有害气体对人体健康的影响

人类生活在大气层里，一刻也离不开清洁的空气，如一个成人每天约消耗0.75公斤的氧气。一个人几天不吃东西、不喝水尚可忍耐。但是如果没有空气，只能活5分钟。可见清洁空气对人的重要性。

由于在人的生活中需要呼吸大量的空气，故当空气污染后，便会对人体健康产生严重影响，据统计，近些年来，由于空气污染日渐严重，使患肺癌、支气管炎和哮喘等呼吸道系统的疾病和心血管疾病的发病率大增。如在近50年间在英国患肺癌的发病人数就增加了40倍。欧、美、日近20年来呼吸道疾病增加了9倍。

有害气体对人的危害，主要是由于人呼吸了被污染的空气而产生，首先是污染物质对喉头粘膜产生刺激，进而反复作用于支气管粘膜，结果引起支气管的反射性收缩。另外因对粘膜的直接作用，从而引起粘液的大量分泌，粘膜肿胀或者破损，且与支气管收缩相连系，引起呼吸道收缩，这样便增加了呼吸空气的阻力。这些症状，在最初是可逆的，以后逐渐变为不可逆。呼吸道收缩造成肺内气体分布的不均匀，对支气管呈异物刺激，便产生呼吸器官防御能力的纤毛运动削弱的不正常现象。此外，还引起肺组织的水肿。由于上述变化，因而增加了病菌和病毒的感染机会。再者，有些污染物质本身也容易引起细菌和病毒的感染。症状如果进一步恶化，就发展到肺泡变性充血、肺部发生组织纤维化，并出现气体扩散机能的障碍。因此，肺泡换气机能减弱。这种变化伴随肺部血流的变化，给心脏增加压力，从而发生心肺性疾病，特别是呼吸机能降低，呼吸阻力增加，多痰、咳嗽、呼吸困难等。由其影响而产生咽喉炎、中耳炎、慢性支气管炎、肺气肿、肺癌及支气管哮喘等病症。

在大气污染中，对人体有害的物质主要是氮氧化物（ NO_x 、 NO 、 NO_2 ）、二氧化硫（ SO_2 ）、一氧化碳（ CO ）和粒状浮游物质。

(二) 重金属对人体健康的影响

重金属元素的种类很多，其中有些在人体中含有少量，而且是人体所必需，如铁、铜、锰、钴等。但若超过限量便会使人产生重金属毒害。还有一些重金属，即使少量进入人体，也会发生剧毒作用。一般称这些重金属为金属毒物。如汞、镉、砷、铬、铅等。下面简要说明其对人体的危害症状。

1. 汞 (Hg)

汞对环境的污染，主要来自工业废水，当大量的含汞废水排入水体后，造成水体污染，然后汞经过海水→鱼→人的复杂迁移过程，通过食物链而在人体中富集。当达到一定量时，便产生毒害。在日本等地发生的多次“水俣病”便是汞害的实例。据统计，从1953年~1960年间，就有116人因水俣病而无法挽救，其中43人死亡。汞中毒的不防之症，已被肯定是汞对脑细胞的广泛损伤，使受害者的神经中枢中毒而造成精神失常，进而引起死亡。轻者齿龈出血，体重减轻（即所谓“汞病”）。

2. 镉 (Cd)

镉的毒性较强，可随饮水进入人体，并在肝、肾、脾脏和胰腺、甲状腺内逐渐积聚。据有关资料介绍，镉累积在柔软组织中，在人体中可引起贫血症和降低血液中的氧以及提高动脉的血压，损害肾、肺、骨骼等。在日本发生的“骨痛病”便是镉为害的突出例子。

3. 砷 (As)

砷的毒性较大。特别是它的三价和五价化合物随饮水进入胃肠道很容易被粘膜吸收进入血液中，扩散到所有的器官和组织中，并在其中积累起来。特别是在肝脏中，引起肝细胞退化变性，及肝糖消失。使心脏和脑髓引起贫血，产生虚脱，丧失知觉，发生痉挛等。

4. 铬 (Cr)

铬对人的危害，主要是通过吸入铬酸雾和可溶性铬盐尘埃、皮肤接触等。以六价铬的化合物危害严重，它对人体的毒害是多

方面的。主要症状是能引起关节痛、贫血、骨脱钙发展至骨收缩、骨折。六价铬能使皮肤、口腔及咽喉发炎，肺部疼痛，尿量减少，呕吐及腹泻。重者有鼻中隔溃疡穿孔，变态反应和致癌等。

5. 铅 (Pb)

铅对人的危害，主要通过肠胃，它很容易被胃、肠吸收，通过血液扩散到全身器官和组织，并进入骨骼。铅中毒的主要症状是失眠疲倦，血细胞减少，引起神经炎。儿童中毒后，有碍脑的发育。

其次还有农药、致癌物质3, 4-苯并芘等对人体健康均有直接的危害。因此，搞好环境保护工作，就是保护人民的健康，就是为子孙后代造福。

第二篇 环境污染治理的生物学问题

环境污染的防治，是一项极其复杂的任务。生物与环境污染的防治有着密切的关系。生物在污水处理、大气净化与生物监测方面已经得到了广泛的应用，特别是固相酶和遗传工程等新技术的研究和应用，将为环境污染的生物防治开辟更加广阔的途径。因此环境污染的生物学防治已经或正在受到人们的重视。

本篇主要介绍微生物、原生动物与植物在改善和净化环境中的作用及其在环境质量的生物学评价与监测方面的应用。由于这一方面涉及到的微生物学基本知识较多，因此有必要对微生物的基本特性加以简单地介绍。

第一章 微生物与环境保护

一、微生物的生物学特性

微生物是一类体形微小、结构简单的生物。一般肉眼看不见，通常用一千倍以上的光学显微镜或电子显微镜观察。微生物包括细菌、酵母菌、霉菌、放线菌、病毒、藻类和原生动物等。也有专指细菌的。在日常生活中，经常遇到微生物所引起的现象，例如夏天牛奶变酸凝固、食品发霉发臭，都是微生物的作用。

微生物虽小，但神通广大，应用广泛。主要是因为它具有分布广、种类多；繁殖快、作用大；新陈代谢能力强和容易变异等生物学特性，这是其它生物不能与之相比的。

(一) 微生物的基本特征

1. 细菌

(1) 细菌的形态：细菌是微小的单细胞生物，其大小常以微米(μ)表示。细菌的形状比较简单，基本可分为球状、杆状和螺旋状三种(图2-1-1)。其中以球菌最小，直径只有0.2~5微米，大多数约为1微米左右。杆菌一般长度为1~5微米，宽0.5~1.5微米。

细菌的形态与环境因素如温度、培养物的浓度和成分以及培养年龄等均均有关系。一般幼龄细菌形态正常、整齐。通常在适宜温度下培养18~24小时检查其形态。

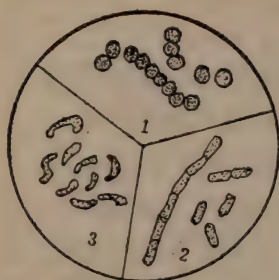


图 2-1-1 细菌的形状

细菌在培养基上生长繁殖到一定时期，就能形成肉眼可见的群体，称为菌落。要观察菌落特征，一般需要培养3~7天左右，甚至更长一些。液体培养将需要1~3天方可进行观察。菌落状况是菌种鉴定的重要参考依据之一。

(2) 细菌的细胞构造：细菌的基本构造包括细胞壁和细胞质。有些细菌外部还有鞭毛或荚膜，有的则在细胞内形成芽孢。(图2-1-2)。

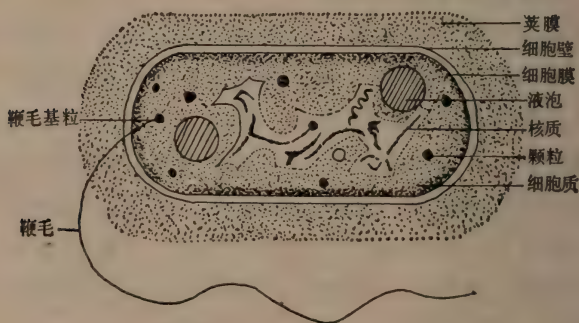


图 2-1-2 细菌细胞结构示意图

细胞壁是细胞最外面的一层薄膜，无色透明，有固定菌体外形和保护菌体的作用。

细胞质是一种无色透明的粘稠状胶体，它具有生命物质的各种特性。细胞质中存在的内含物主要是核蛋白体，相当于高等生物细胞中的微粒体。具有各种酶系统，使合成与分解作用不断地进行。细菌一般没有定形的细胞核，只具有分散的核质，故称为

原核微生物。

有些细菌在一定营养条件下，常向细胞壁的表面分泌胶质状的粘液物质，形成较厚的膜，称为荚膜。荚膜有抗吞噬作用和抗干燥作用。有时候荚膜不仅围绕着一个单独细胞，而且围绕着许多细胞，形成所谓的菌胶团。凡能形成菌胶团的细菌，称为菌胶团形成菌。

有些细菌能从体内长出细长的丝状物，称为鞭毛，它是细菌的运动器官。

某些细菌，主要是杆菌，在一定的生活周期能在体内产生芽孢（图2-1-3），它是由菌体细胞质和核质浓缩凝集形成的。芽孢是一个休眠器官，对不良环境具有很强的抵抗能力。



图 2-1-3 细菌的芽孢

（3）细菌的生长曲线

及其在废水处理中的应用。细菌进行无性分裂繁殖，在适宜条件下繁殖速度极快。当培养条件不变时，定时取样，计算菌体数目或细胞重量。以时间为横坐标，增长的数目或重量为纵坐标，可以绘出一条曲线，称之为生长曲线。生长曲线反映了单细胞微生物从培养基开始生长到最后衰老的整个过程中的菌体数目（或重量）和生理变化（图2-1-4）。整个生长曲线可分为以下四个时期：

1）缓慢期（延迟期、适应期）：当菌种接种到新培养基内，开始一段不繁殖，细菌数目不增长，生长速度近乎是零，这是细菌适应新的环境的一个阶段，因此也称为适应期。

缓慢期的长短与菌种、菌龄、接种量、培养条件有关。如同一菌种加大接种量可以缩短缓慢期；把对数期菌体接入新培养基中，可不经缓慢期而立即以对数速度生长。

2）对数期：在适应期后，紧接着就是一个生长速度达到高

峰时期。这一时期菌体分裂最快，菌体整齐、健壮、代谢旺盛。此时菌数以几何级数增加（即 $1 \rightarrow 2 \rightarrow 4 \rightarrow 8 \rightarrow 16$ ），故称对数期。

对数期长短和繁殖速度，与菌种和培养条件有关。例如，只有在最适宜温度范围内才出现最高繁殖速度等。

3）稳定期（平衡期）：此期菌体生长繁殖速度逐渐下降，同时菌体死亡数目逐渐上升，总的来说，细菌数目没有大的改变，即新增殖的菌数和死亡数几乎相等。稳定期的出现是由于培养基的营养物质减少和对菌体有毒的代谢产物的积累。

4）衰老期：这一时期菌体死亡速度大量增加，超过了繁殖的速度，只有少数菌体进行繁殖，产芽孢的细菌形成芽孢体，所以生长曲线显著下降。

微生物生长曲线在污水处理过程中表现了类似的规律，在活性污泥培养阶段尤为明显。主要反映在以下几方面：

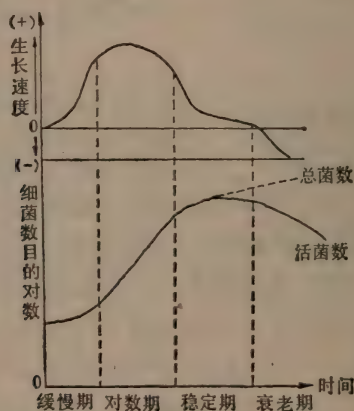


图 2-1-4 细菌的生长曲线

1）在活性污泥培养初期，为了缩短污泥培养时间，加速污泥的形成，常采用适当的闷曝，加入下水道的污泥、剩余活性污泥和生活粪便等都是缩短缓慢期的重要措施。这一时期污泥浓度变化不大，原生动物很不活跃。

2) 对数期是污泥形成过程中关键时刻, 对于表面加速曝气池来说, 就是利用对数期的微生物来处理污水的。由于这个时期的细菌代谢旺盛, 所以处理速度快, 污泥在池中停留时间短, 可以大大节省设备投资和占地面积。但由于要维持细菌在对数期的生长繁殖, 就需要有充分的食料(有机物)。在这种情况下, 相对地说, 出水中含的有机物浓度也就比较高。同时由于此期细菌活力很强, 不易凝聚和沉淀, 所以出水效果不一定理想。因此在设计上常常采用生长率下降阶段或生长率上升的后期来使污水有机物质稳定化, 也就是对加速曝气池处理污水来说, 严格地讲, 可能就是利用由对数期进入稳定期的一段时间。

如何估计污泥培养过程中的对数期呢? 主要是根据污泥培养过程中, 污泥体积和浓度的突变, 和与此同时数量起急剧变化的主要微生物来考虑。有的资料指出: 在培菌过程中, 经短时期的缓慢期后, 原生动物、球衣菌、菌胶团不断增加, 尤其球衣菌和菌胶团增长更为明显, 当菌胶团数量达到高峰时期, 出水初见处理效果, 可能就是污泥的对数期的到来。当菌胶团高峰维持一段时间后, 新生菌胶团的数量明显下降, 但胶质变浓, 这时污泥体积有一个明显的上升, 这个时期可能就是活性污泥由对数期进入稳定期的关键时刻。所以认为, 菌胶团数量达到高峰后不久, 就是污泥体积和浓度的突变阶段, 这是活性污泥处于对数期的一个重要标志。

3) 当对数期的营养不足时, 污泥中的微生物则向稳定期过渡, 这就是所谓的延时曝气。这种曝气池内污泥停留时间长, 占地面积和耗电量都比较大。但其优点是比较稳定, 对营养要求低, 管理方便, 出水效果比加速曝气池好。

4) 在稳定期如果继续营养贫乏, 而供氧依然充足时, 则污泥松散, 粒子破碎, 不呈絮状。有柄纤毛虫带着小泥块游动。这标志着活性污泥中的微生物进入了衰老期, 污泥开始老化。这时如果进水浓度较高, 则处理效果很差, 此即所谓的内源呼吸阶段。

因此，可以根据实际情况，运用细菌生长曲线的基本原理和规律进行污水生物处理构筑物的设计，指导正常运行管理，以提高处理效果。

2. 其他微生物

在自然界中，除简单细菌外，还有一些比较高等的细菌。一类是单细胞的、具有分枝的微生物，叫做放线菌。这一类微生物介于细菌和真菌之间；还有一些是多细胞的丝状群体，叫做丝状细菌，如球衣菌 (*Sphaerotilus*)、丝硫菌 (*Thiothrix*) 等，这类细菌大量繁殖，会使污泥膨胀，影响沉淀。

真菌（包括酵母菌和霉菌）是一类具有真正细胞核的微生物，故称真核微生物。酵母菌多呈圆形或椭圆形，为单细胞微生物；霉菌细胞呈丝状，菌丝较粗（图2-1-5）。

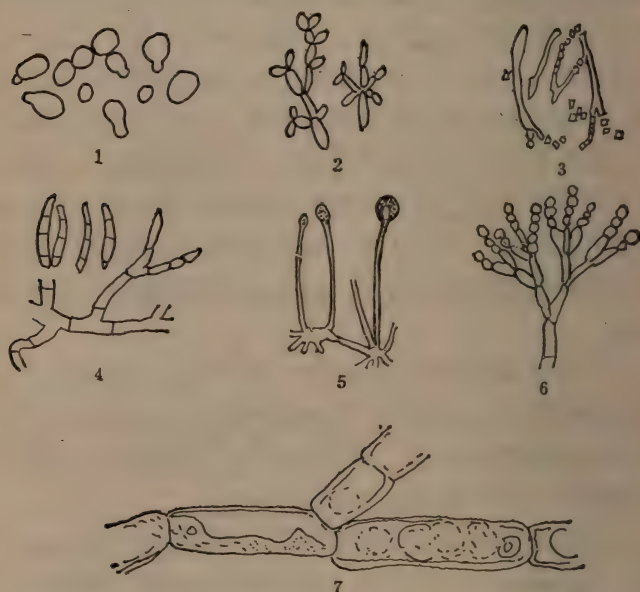


图 2-1-5 某些真菌形态

1—酵母菌；2—假丝酵母；3—白地霉；4—镰刀霉；5—根霉；
6—青霉；7—节水霉

此外，还有病毒，它是目前知道的最小微生物，只能用电子显微镜方可看见。因此称为超显微镜微生物。由于这种微生物能通过一般细菌过滤器，所以又叫滤过性病毒，简称病毒。细菌病毒又叫做噬菌体。

为了方便工作和查阅资料，特将中国科学院微生物研究所编著的《一般常见细菌鉴定方法》一书中的常见细菌检索表列于附录一，供作参考。

（二）微生物的生活特性

1. 营养要求

各种细菌的生活环境和合成能力不同，所需要的营养料也不一样。凡是营养要求简单，合成能力强，能在完全无机物（如 CO_2 ）的环境中生长繁殖的细菌，叫做自养菌；凡是合成能力差，需要复杂有机物（如碳水化合物）方能生长的细菌，叫做异养菌。其他各种微生物，根据它们对营养要求的不同，也可分属于自养或异养这两大类。

细菌要进行各种生命活动，就必须从周围环境中吸收适当的物质，包括含氮化合物、碳水化合物、无机盐、维生素和水等。这些营养物质主要有以下功能：（1）供给生命活动所必需的能量；（2）提供合成菌体和代谢产物的原料；（3）调节代谢活动的正常进行；（4）提供适宜的代谢环境。

细菌要求的碳源物质很多，对异养菌来说，以糖类较好，尤以葡萄糖、蔗糖、麦芽糖为最好；氮源物质包括有机和无机含氮化合物，常用的有硝酸盐、铵盐、蛋白胨、牛肉膏、酵母膏等；矿质盐类有磷、钾、钠、镁、钙；另外为了保证细菌良好生长，酌加少量氨基酸和维生素。

营养物质可以通过被动吸收（扩散作用）、主动吸收（代谢作用）与选择吸收等方式，而进入细菌体维持其正常的生命活动。

现在已经知道氧、二氧化碳等因单纯扩散作用透过细胞膜。而大部分化合物是依靠主动吸收进入细胞，而且认为这一透过现

象是由透膜酶的催化作用所产生的。

2. 酶

酶是生活细胞制造出来的具有催化作用的一类特殊蛋白质，因此称为生物催化剂。

酶加速化学反应的能力，称为酶的活性，这一反应称为酶促反应。被酶作用的物质，称为底物。

酶除了具有一般催化剂的性质之外，还具有特异性，催化效率高和作用条件温和等特点。

酶所以能够加速化学反应，是由于它能够降低反应所需的活化能。酶催化底物变化，与酶的分子结构有关。主要是酶的活性中心必需基团与底物结合，并催化底物反应的。因此，酶活性中心是酶能起特异催化作用的关键部位。

按位置酶可分为胞外酶和胞内酶。生物细胞产生的酶，有的分泌到细胞外，称为胞外酶；有的酶产生后留在细胞内催化化学反应，叫做胞内酶。根据催化反应的性质，酶可分为水解酶类、氧化还原酶类、转移酶类、裂解酶类、异构酶类与合成酶类等。因此，生物体内的一切变化都是酶催化的。

酶的作用就其本质来看，受着许多因素所左右，其中经常遇到的是底物与酶的浓度、抑制剂、酸碱度和温度等，而最基本的是酶和底物浓度，因而在研究酶反应的动力学时，最重要的还是研究底物浓度对反应速度的影响。

3. 呼吸作用

(1) 呼吸的基本概念与类型：物质在生物体内的氧化称为生物氧化。由于这一过程消耗氧，生成水和二氧化碳，并在细胞内进行，所以又叫做细胞呼吸。因此广义地把生物氧化称为呼吸作用。

在生物氧化中，把脱氢的物质叫做给氢体或基质；携带并传递氢者叫做递氢体；接受氢的物质叫做受氢体。如果受氢体是分子氧，就称为呼吸；如果受氢体是中间代谢产物，则称为发酵；如果受氢体是某种无机化合物，就称为无氧呼吸（或无机盐呼

吸)。脱氢、递氢和受氢是生物氧化中三个主要环节，在这一过程中与磷酸化反应偶联，产生大量供生物利用的高能化合物ATP*，所以也将这一生物化学过程叫做氧化磷酸化反应。

通常把大气中氧是受氢体的呼吸称为好氧呼吸，把受氢体是分子氧以外的其他物质的呼吸称为厌氧性呼吸。根据微生物对分子氧的要求，可以将微生物分为四类：

1) 专性好氧微生物：仅在在有氧条件下才能生长，它们只能以分子氧作为呼吸链的末端受氢体。

2) 专性厌氧微生物：仅在无氧条件下才能生长，这类微生物以代谢的中间产物作为呼吸链的末端受氢体。

3) 兼性厌氧微生物：它们在有氧或无氧条件下都能生长。

4) 微好氧菌：只在含有微量氧的条件下才能生长。

(2) 基本呼吸：直接参与呼吸的物质叫做基质，如葡萄糖等。呼吸作用是一种酶促反应，所以呼吸基质同时又是酶的基质。

在呼吸材料中，糖是主要基质。糖类当中，葡萄糖、果糖这一类六碳糖和蔗糖是最好的呼吸材料，麦芽糖、淀粉都是借水解酶的作用变成六碳糖以后才成为呼吸材料。脂肪在水解为甘油和脂肪酸以后才能用于呼吸。蛋白质、肽、氨基酸等各种含氮有机物，有时直接用于呼吸，有时借去氨作用使氮游离成羧酸后用于呼吸。当然各种微生物对呼吸材料的利用是不相同的。

所谓基本呼吸，也就是当糖类消耗完而借蛋白质来进行的呼吸。这种呼吸的特点是比较正常的碳水化合物呼吸低得多。因此，当碳水化合物不足时，不仅呼吸强度降低了，而且呼吸过程的性质也改变了，在这种情况下，呼吸就靠蛋白质来进行。

在活性污泥培菌中可以看到，当碳源全部耗尽时，菌体的含氮物质分解即引起自溶作用。污水生物处理工程中通常遇到的内源呼吸，其实质就是生理学上以蛋白质为呼吸材料的基本呼吸，

* ATP—三磷酸腺苷。

这是一种营养条件不正常的表现，在工程运行管理中应该注意这一问题，保证运转的稳定性。

微生物的生命活动与环境因素有着密切的关系。环境因素包括温度、酸碱度、营养物质、氧气、毒物及生物间相互竞争与共生等关系。这里主要介绍微生物对温度和酸碱度的要求。根据它们对温度的反应，可把微生物分成中温性、好热性与好冷性三种类型。废水处理中常以中温性较为主要，最适温度为 $20\sim 30^{\circ}\text{C}$ 之间，当超过 40°C 时酶发生变性，甚至引起微生物死亡。有些好热性微生物可在 $50\sim 60^{\circ}\text{C}$ 繁殖，污泥高温厌氧处理菌即属此类。低于 5°C 时，一般微生物代谢受阻，呈休眠状态，只有那些好冷微生物方可进行生命活动，所以通常在 4°C 以下保藏菌种。

酸碱度对微生物影响也比较大，一般为 $\text{pH}6\sim 9$ 之间，多数适宜于 $\text{pH}7$ 左右，强酸强碱环境对一般微生物的活动都是不利的。

最后还应提到，由于微生物具有遗传变异的特性，可以通过各种物理、化学因素进行诱变育种，获得性能良好的新菌种，这对污水生物处理具有重要的意义，而且已经取得了许多新的成绩和进展。

二、废水生物处理的基本方法和对水质的要求

（一）废水生物处理的基本方法

废水处理的方法多种多样，但总的来说，可分为物理法、化学法和生物法三大处理类型。

物理法主要是利用物理作用原理来处理废水中的悬浮物。例如沉淀法、浮选法（气浮法）、过滤法等。

化学法主要是利用化学作用来处理废水中的溶解物质或胶体物质。例如中和法、萃取法、吹脱法以及水的氯消毒等。

生物法是利用微生物的作用处理废水中胶体的和溶解性有机物质。根据在水处理过程中起作用的微生物对氧气要求的不同，废水的生物处理可分为好气生物处理和厌氧性生物处理两类。活性污泥法、生物过滤法、生物氧化塘和污水灌溉均属废水的好气

生物处理。污泥消化池则属于厌氧生物处理。对于某些高浓度有机废水（如酒精工业废水、屠宰场废水等）来说，也需先进行厌氧气法处理，然后根据需要再用好气法进行处理。

生物法已在污水处理中占据了重要的位置。一些国家生物处理厂总数的比例列举如下：

日本，在1973年的318座中有299座，占94%。

瑞典，在1973年的1523座中有1080座，占71%。

美国，在1976年的22600座中有15400座，占68%。

上述情况说明生物处理法在污水处理方面起着相当重要的作用。下面介绍几种主要生物处理法及其发展概况。

1. 活性污泥法：

活性污泥法是以污水为培养基，培养大量好气性微生物，构成生物絮体，使水中污染有机物通过生物吸附沉淀、氧化分解达到净化之目的。

活性污泥法自1913年在英国初建至今，经过六十多年的发展，已成为最主要的生物处理法。世界上一些大型污水厂都采用活性污泥法。

活性污泥法的基本类型，是普通曝气法，它是一个矩形水池，经沉淀后的污水从池的一端流入，同时供给活性污泥，污水与活性污泥的混合物缓缓流过池内，由池底一侧通入压缩空气，使污水混合液细旋流动，这就是细流式曝气池。这种方法的处理深度是其他生物法不能比拟的。目前最常用的是阶段曝气法和生物吸附法。活性污泥法曝气时间特长者（>24小时）为延时曝气，曝气时间特短者（1~2小时）为高速曝气。

五十年代以前，活性污泥法均为推流式。五十年代初出现了完全混合式的流态。目前国外在大型城市污水厂中多使用推流式，在小中型规模，水质不稳定时，多采用完全混合系统。

我国于1958年已将上海普通活性污泥法曝气池改造为生物吸附法。

为了进一步提高活性污泥法，近年来各国都积极地进行了一

些新系统的研究，已有许多新的变法，如深层曝气、纯氧曝气、投料活性污泥法等。

2. 生物过滤法

常见的就是生物滤池。它是一个圆形或矩形构筑物，内装粗滤料层（如矿渣、煤渣等），具有很大的表面积，吸附能力很强，间隙中充满空气，经过沉淀的污水流经生物滤池时，与滤料接触，产生了吸附作用，污水中的微生物也被阻留在滤料表面，微生物不断繁殖，在滤料表面形成了所谓的“生物膜”，在其作用下使污物被分解。

生物滤池的微生物多种多样，有细菌、藻类、原生动物，也有一些后生动物如蚯蚓、蠕虫等。各种微生物在滤层中的作用不同，水藻放出氧气，帮助细菌氧化溶解状的有机物；原生动物以细菌为食，使生物膜获得更新；最后蚯蚓在滤层中活动，可以松动生物膜，还吞下各种有机颗粒进行分解。因此，可以说这些生物群之间充满着拮抗和互生的关系，处于相对的平衡状态，共同完成污水的净化处理工作。

生物过滤法亦是一种常用的污水生物处理法，净化污水的主要机理如前所述，是靠附着在滤料表面的生物膜对污水中有机物的吸附氧化作用。

自1893年英国首先采用滴滤池以来，已有不少变法。按负荷可分为普通生物滤池和高负荷生物滤池。近年来又建起了塔式生物滤池。

根据与生物滤池相同的原理，1954年由德国人提出了生物转盘，又名浸没式生物滤池。目前已有不少国家和地区采用。

3. 生物接触氧化法

接触氧化法是一种兼有活性污泥和生物过滤法特点的生物处理方法，近几年首先在日本试验应用。此法是将大量生物团粘附在生物氧化器内蜂窝填料的表面，使充氧（空气）的污水在氧化器内反复循环，与生物不断接触，污水中有机物经吸附、同化和异化，最终降解为二氧化碳和水。我国北京市环境保护研究所和

上海、西安等地都有应用的试验。

近年来还发展了以颗粒活性炭作为填料接触好气性微生物的滤床，有的称之为“吸附生化法”，在提高处理效率和活性炭的再生方面都有一定的优越性。

4. 氧化塘

氧化塘又称稳定塘。塘内的有机物由好气性细菌进行氧化分解。池内的有机体有菌类、藻类、原生动物、轮虫和高等动植物等，但以藻、菌为主。主要是借藻类和细菌的共生关系使污水获得净化，其关系如图2-1-6所示。

氧化塘处理污水，实际上是一个水体自净过程。方法简便，费用较低，还可养鱼、繁殖藻类，作为副产品。我国南方河网地区更为合适。目前各国仍在使用，这种方法在美国发展很快，在数量上仅次于活性污泥法。

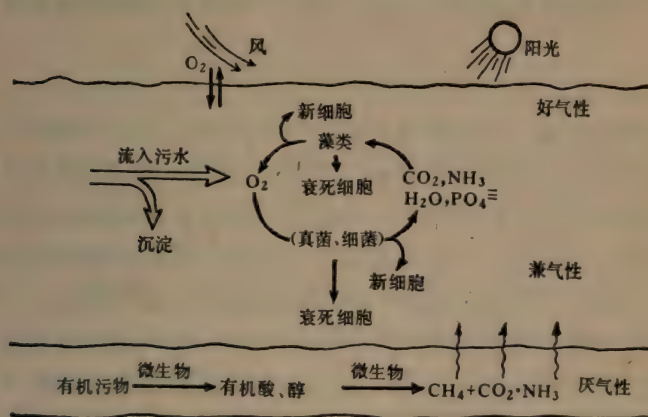


图 2-1-6 氧化塘工作示意图

由上述各种方法的介绍可以看出，生物学在污水处理工作方面早已得到了应用，而且不断向纵深发展。但迄今为止关于生物处理系统的微生物群系功能的知识了解的还很不够，因而使微生物在污水净化中的作用受到了一定的限制，这些都有待进一步研究。

另外，污水灌溉又称土壤法，也可以利用土壤颗粒表面形成的生物膜使污水中有机物分解氧化。我国目前多采用污水经适当处理作农业灌溉，但二次污染仍是一个急待解决的问题。

厌气性微生物主要用于污泥消化和高浓度废水的处理方面。

废水中能被细菌分解、氧化的有机物含量，可用生化需氧量（BOD）表示。BOD表示生物氧化水中有机物所需要的氧量，常用毫克/升表示。生化需氧量越高，表示水中有机物越多，也即水体被污染的程度越高。目前都以五天作为测定生化需氧量的标准时间，称为五天生化需氧量（BOD₅）。

废水中有机物的氧化和合成的比例随有机物的性质和微生物的种类等而有所不同。一般情况下，所产生的新细胞物质（原生质）约为所去除BOD₅的50~60%。

（二）废水生物处理的条件控制

为了有效地控制生物处理，在生产运行中必须要注意以下几点：

1. pH值

生物处理时，一般要求pH值在6~9之间。pH不低于5.5，不高于10。但微生物经过驯化以后某些营养成分的缓冲作用，pH值的影响不够显著。我们曾在某厂做表面加速曝气池处理印染废水时，当进水pH值高达12时，短期内对处理效果未受明显影响，但较长时间的较高pH值会显著地降低处理效果，BOD₅，除去率可由90%左右突然下降到10%左右。曝气池混合液的pH，可影响污泥中微生物的种类，也会影响污泥指数*。有的资料指出，当混合液的pH值在6.5到7.5时，污泥指数最低，pH为7时次之。混合液pH值呈酸性，则活性污泥分散，失去沉降性，而且酸性环境有利于丝状菌的增长，可以使污泥指数增高，这些都是引起膨胀的原因。

* 所谓污泥指数是指曝气池混合液经30分钟沉淀后一克干污泥湿时所占的体积（以毫升计），以SVI表示。

2. 温度

通常认为20~30°C废水的处理效果最好，在10°C以下或35°C以上，中温性好气细菌的活性便降低。在夏季当水温达到30°C以上时，丝状菌增长，容易造成丝状菌膨胀。当温度在10°C以下，必须提高MLSS*，以保持足够的微生物来氧化废水中的有机物。

我们在试验中，由于开始时水温保持在10~12°C，结果活性污泥培养很慢，当水温升至20~25°C时，一周之内污泥体积就增加到20~30%左右。所以在废水生物处理过程中，要注意控制水温。

3. 溶解氧

因为污水处理是利用好气性生物处理的，所以水中必须供给充分的氧，才能把水中的有机物氧化。氧气太少生物氧化降低，处理效果下降。一旦缺氧，污泥或生物膜腐败。如果氧过多，不仅是一种浪费，也会因营养不足而产生污泥自身氧化，使之衰老。

生物处理系统中氧的作用主要表现在两个方面：（1）合成新的生物有机体；（2）呼吸作用。

一般曝气区的溶解氧控制在1~3毫克/升左右，或出水溶解氧在0.5~1毫克/升。只要能满足这个要求，便可以认为系统中氧气的供给已经够用。

溶解氧常因进水中有机物的多少而发生变化，当进水中有机物浓度太高，则混合液中溶解氧就下降，如遇此情况，就应增加叶轮转速以提高充氧能力。

如果仍不足以补充被消耗的氧时，就应当减少进水流量。相反，当溶解氧突然上升，说明进水中的有机物浓度太低，这种情况下，可减低叶轮转速，或增加进水流量。

4. 营养

要提高有机废水的生物学氧化效率，废水中必须含有一定的

* MLSS—指活性污泥混合液悬浮物浓度。

营养物质，这样才能利于活性污泥的增长。在生活污泥中，碳、氮、磷都有，尽管从营养角度来看，往往不能满足微生物最好营养要求，但基本上能够正常生长繁殖。在工业废水中，常常缺乏氮、磷，所以有条件时尽可能地掺入生活污水，或者投加氮、磷。氨氮是最容易被微生物吸收利用的，有机氮也可以被利用一部分。

通常废水中BOD和氮、磷合适的比例是：

$$\text{BOD} : \text{N} : \text{P} = 100 : 5 : 1$$

如果符合这个比例，一般都能满足生化过程的需要。最低要求是：

$$\text{BOD} : \text{N} : \text{P} = 100 : 2 : 0.5$$

在活性污泥培养阶段，营养要求可能要高一些。有的资料指出培菌期耗氧量：氨氮=10：1以上时，活性污泥的增长正常。

某些工业废水处理效率和含氮量的关系如表2-1-1所示。

表 2-1-1 工业废水处理效率和含氮量的关系*

BOD : N	BOD : P	BOD		
		原废水 (毫克/升)	处理水 (毫克/升)	去除率 (%)
20 : 1	100 : 1	880	11	98.6
50 : 1	200 : 1	880	18	97.5
100 : 1	500 : 1	880	77	91.2
200 : 1	1000 : 1	880	130	84.5

* 引自李汉昭编，活性污泥法概述，1977年。

5. 有毒物质

许多重金属离子对微生物有毒害作用。酚、氰、腈、硝基化合物等，一方面有毒性，另一方面又能被某些微生物分解利用，使之无毒性，但承受的浓度有一定限度（表2-1-2）。

活性污泥法在水处理中占有重要的位置，广泛地用于城市污

水及工业废水的处理中，它是二级处理效果最高又比较成熟的方法，对大量的污水处理更显适用有效。

表 2-1-2 好气生物处理构筑物进水毒物的容许浓度

毒 质	容 许 浓 度 (毫克/升)	毒 质	容 许 浓 度 (毫克/升)
锌 (Zn)	20	氨	100~1000
铜 (Cu)	5~20	硝酸根 (NO_3)	5000
铅 (Pb)	1	硫酸根 (SO_4)	5000
铬：铬酸盐	5~20	氯化物 (Cl)	10000
氰 (CN)	5~20	醋酸根 (CH_3COO)	100~150
硫 (S)	10~30	酚	100
砷：亚砷酸盐	5	甲醛	100~150
砷酸盐	20	丙酮	9000
游离氯	0.1~1	油脂	30~50

在运转前，首先培养活性污泥，并使它适应所处理的废水特点，这一段工作就称为培菌和驯化。培菌和驯化往往是一道进行的，对于处理工业污水，特别是有毒工业污水，污泥驯化极为重要。驯化的目的有三个：（1）特殊物质分解菌的繁殖和不适应菌的自然淘汰；（2）细菌适应酶的产生和增加；（3）确立有机分解过程中各生物的作用和秩序。概括地说，就是培植适合于被处理污水的微生物，淘汰不适应这种环境的各种微生物，因而这种活性污泥实际上是一种混合菌的活性有机体。由此可见，活性污泥主要是由于水中所繁殖的大量微生物凝聚而形成的絮状泥粒。正常的活性污泥呈褐色或黄褐色。微生物和有机物构成活性污泥的挥发部分（即挥发性活性污泥），约占全部活性污泥的70%以上。活性污泥含水率一般在98~99%左右。它具有较强的吸附和氧化分解有机物的能力。活性污泥法就是以活性污泥为主体的废水处理法。

三、废水处理微生物学

前边说过，活性污泥主要是由大量微生物形成的絮状泥粒。组成活性污泥的生物包括：能用显微镜观察到的微生物和肉眼可

以看见的目视生物。如加以分类，则可分为细菌、真菌、藻类、病毒等植物类和原生动物、轮虫、线虫等后动物类。但在活性污泥的构造和功能上起主要作用的还是细菌。因此本节主要介绍活性污泥中的细菌等微生物学特点和组成的一般规律。

在废水处理中有各种微生物，尽管构成活性污泥的微生物千变万化，但必须具备以下四个条件：（1）能依赖和利用废水中所含的有机物质，或其他微生物的分解代谢物质为营养。（2）能适应曝气池的环境（溶解氧、pH、水温等）。（3）能忍耐废水中的有毒物质。（4）能与曝气池内活性污泥中已有的微生物共同生存。由于废水种类和环境条件不同，因此在进行生物处理中的生物相也不同。过去曾经认为活性污泥是由单独的菌胶团等特定的细菌或至多也只限于二、三种细菌集居所形成，但以不同的废水作为培养基，在某些特定条件下出现的微生物群绒粒——活性污泥，其构成微生物并不限于某一特定的种，而是在不同营养、供氧、温度、pH值等条件下，形成以最适宜增殖的微生物为中心与多种多样生物相结合所组成的一个生态系。下边分别介绍废水处理的微生物生态组成特点。

（一）活性污泥的细菌组成

好气处理（如曝气池、滤池、生物转盘等）中起净化作用的是活性污泥（或生物膜），因此活性污泥中的微生物群落组成和数量变化，就成为影响处理效果的一个重要研究问题。早在30年代中，认为在净化有机物中起主要作用的是分枝动胶杆菌（*Zoogloea ramigera*），以后不少工作者对活性污泥中成絮菌，优势种等进行了分离鉴定，对其生理特性等也进行了一系列的研究。

在早期的研究中，主要是对生活污水和人工合成污水处理中微生物加以研究，经常发现大量的肠内细菌。自Allen（1944年）起，发现活性污泥中的优势种并非肠内细菌，而是无色杆菌属（*Achromobacter*）、黄杆菌属（*Flavobacterium*）和假单胞杆菌属（*Pseudomonas*）等革兰氏（一）细菌群。

Scinosuke Ueda 等人（1972年）的资料指出，从活性污泥

中分离出54个菌株，经鉴定分别属于假单孢杆菌属、菌胶团属 (*Zoogloea*)、弧菌属 (*Vibrio*)、埃希氏杆菌属 (*Escherichia*)、杆菌属 (*Bacterium*)、短杆菌属 (*Brevibacterium*)、副大肠杆菌属 (*Paracolobacterium*)等，其中以假单孢杆菌属 (又名极毛杆菌属) 的种在污泥的群落中占优势。Pike等 (1971年、1972年) 综合报导了活性污泥中的细菌有十八个属，主要有假单孢杆菌属、菌胶团菌属、色杆菌属 (*Chromobacterium*)、芽孢杆菌属 (*Bacillus*)、无色杆菌属、肠杆菌属、微球菌属 (*Micrococcus*) 等。我国湖北水生生物研究所曾在活性污泥好气性异养菌的研究中，对分离出的60个菌株作了鉴定，初步认为有动胶杆菌属 (即菌胶团菌属)、无色杆菌属、黄杆菌属、产碱杆菌属 (*Alcaligenes*)、微球菌属、短杆菌属等，而且认为在正常运转时，种类比较单纯，动胶杆菌属占绝对优势；不正常时，种类分散、多样、动胶杆菌不再占优势，出现不少生活污水中常见种类。以上这些资料表明，在污水好气性处理过程中，微生物的群体组成是很复杂的，优势种也在发生变化。

滝口洋 (1978年) 综合了活性污泥中的主要细菌列于表2-1-3。从表中可以看出以下几点：

(1) McKinney 等研究生活污水活性污泥细菌，认为最占优势的是假单孢杆菌属。

(2) Jasewicz 等对乳剂活性污泥中的细菌进行分离，发现在正常状况下，产碱杆菌属和黄杆菌属占优势；在饥饿状况下，则以芽孢杆菌属和杆菌属占优势。

(3) Rogovskaya 等人对七种废水的活性污泥进行调查研究，结果发现假单孢杆菌属为优势细菌。

(4) Dias 等也对七种活性污泥进行调查研究，结果以单孢弧菌属和菌胶团属占优势。

综上所述，尽管活性污泥中有相当数量的肠内细菌，但有人认为这是临时混入的微生物；杆菌属虽然量少，但在活性污泥中经常见到，因此认为这是偶然进入的，所以这两种菌并非活性污

表 2-1-3 活性污泥中的主要细菌

属 名	Mckinney, Weichlein (1953年)	Jasewicz, Porges (1956年)		Rogovskaya, Lazareva (1959年)	Dias, Bhat (1964年)
		正常状态	饥饿状态		
无色杆菌属 (<i>Achromobacter</i>)	+	+	-	-	+
气杆菌属 (<i>Aerobacter</i>)	+	-	-	-	+
产碱杆菌属 (<i>Alcaligenes</i>)	+	+++	-	-	+
芽孢杆菌属 (<i>Bacillus</i>)	+	+	+++	+	+
杆菌属 (<i>Bacterium</i>)	+	-	+++	+	-
棒状杆菌属 (<i>Corynebacteri- um</i>)	-	-	+	-	+
单孢弧菌 (<i>Comamonas</i>)	-	-	-	-	+++
黄杆菌属 (<i>Flavobacteriu- m</i>)	+	+++	+	-	+
小球菌属 (<i>Microbacteri- um</i>)	+	+	+	+	+
诺卡氏菌属 (<i>Nocardia</i>)	+	-	-	-	-
假单孢杆菌属 (<i>pseudomonas</i>)	+++	+	+	+++	+
八叠球菌属 (<i>Sarcina</i>)	-	-	-	+	-
螺 菌 属 (<i>Spirillum</i>)	-	-	-	-	+
菌胶团属 (<i>Zoogloea</i>)	+	-	-	-	+++

注：-表示不能认定；+表示能认定；+++表示能认定多数。

泥的重要微生物。此外，伯杰氏细菌鉴定手册第八版*中认为无色杆菌属是向产碱杆菌过渡的细菌。据此，滝口洋认为正常活性污泥中的主要细菌有下面4~5个属：

产碱杆菌属

芽孢杆菌属

黄杆菌属

假单孢杆菌属

(菌胶团属)

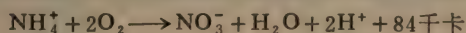
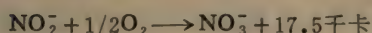
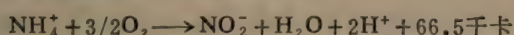
在特殊活性污泥细菌的研究中，发现以下情况：

(1) 在含酚、氰等工业废水的研究中，如发现在含酚废水活性污泥中占优势的细菌是假单孢菌属、棒状杆菌属、无色杆菌属和产碱杆菌属等；在处理印染污水的活性污泥中则以动胶杆菌属占优势。可见水质是影响活性污泥微生物组成的一个重要因素。

(2) 污水营养平衡失调，也会导致细菌组成发生变化。废水营养平衡（即BOD : N : P = 100 : 5 : 1）是保障正常运行的重要条件之一。如果曝气池内氮源过多，则有机氮分解的 NH_4^+ 不能被微生物完全利用，于是出现下列情况：

在曝气池内，剩余氨由亚硝化单胞菌属 (*Nitrosomonas*)、硝化球菌属 (*Nitrococcus*) 等氧化为亚硝酸 (NO_2^-)； NO_2^- 再经硝化杆菌属 (*Nitrobacter*) 氧化为硝酸 (NO_3^-)。这类好气性菌的反应为：

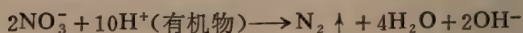
有机氮 (N) \longrightarrow 氨 (NH_4^+)



在沉淀池内， NO_2^- 或 NO_3^- 再经无色杆菌 (*Achromobacter*,

* Breed, R.S., Bergeys Manual of Determinative Bacteriology, 8th, ed., 1974.

sp.)、反硝化微球菌 (*Micrococcus denitrificans*)、反硝化假单胞杆菌 (*Pseudomonas denitrificans*)、荧光假单胞杆菌 (*P. fluorescens*) 等嫌气兼性菌作用，被还原成氮气 (N_2)，反应式为：



这一过程称为生物脱氮，它可以把造成水体富营养化的氮从废水中去除掉。但在废水处理中出现脱氮现象，就可能使污泥沉降性能降低。

(二) 活性污泥中的凝聚性细菌

菌胶团是由细菌及其分泌的胶状物质组成的细小颗粒，也就是所谓的活性污泥絮凝体。菌胶团是在活性污泥培养过程中逐渐形成的，它与污泥吸附、氧化分解有机物的能力、污泥凝聚沉降性能有着十分密切的关系。

菌胶团的作用是：（1）它是活性污泥的主体，是一种粘性的菌胶团块，能使废水中的大量悬浮有机物粘附在菌胶团颗粒上，然后加以分解利用，这就是所谓的吸附作用。（2）菌胶团给需要固定生活的原生动物和丝状细菌（如丝硫细菌等）提供了栖息和附着生长的场所。（3）在活性污泥形成过程中，当出现菌胶团达到高峰之后不久即出现了活性污泥体积与浓度的一个飞速增长阶段，混合液出现明显絮状化结构，这时菌胶团胶质增厚，折光性强，边缘清晰，所以它也是构成活性污泥絮状化的基本成分。（4）菌胶团具有较强的分解有机物的能力，有的试验表明，菌胶团可以大大提高 BOD_5 的去除效率。（5）菌胶团细菌由于菌体包埋于胶质中，就不致被原生动物吞噬，并有利于沉降。

菌胶团细菌除了在营养上对碳素和氮素有一定要求外，并具有较高的好气性，尤其在大量繁殖阶段，特别要注意供氧，否则会给球衣菌繁殖以可乘之机。

菌胶团的形状很多，在活性污泥系统中常见的菌胶团有以下几种（图2-1-7）：

（1）分枝状菌胶团

（2）垂丝状菌胶团

（3）球形菌胶团

（4）椭圆形菌胶团

（5）指状分枝芽殖菌胶团：分枝如手指状分节，每分出一枝就是一节，形似出芽繁殖，有时分出一节不成指状而是球状。

菌胶团的形成和水质有很大关系，如在生活污水的活性污泥中，当有机质较多，水质较“生”，即净化程度较低时，它出现的数量就多，所以在培菌过程的前期菌胶团就达到高峰，构成了活性污泥的主要成分。接着污泥就出现飞跃增长，菌胶团的胶质由透明转暗，具有折光，吸附能力增强、污泥体积剧烈上升，出水效果提高。到培养后期进入运转阶段，典型菌胶团随之减少。所以从菌胶团出现的数量和体积大小可以推断污水处理效果及污泥状况。根据我们在印染污水的活性污泥看到的现象，以及有关资料来看，似乎当出现大型分枝形菌胶团时，在一定意义上预示着活性污泥体积将要出现飞跃性增加，标志着活性污泥的培养基本上成功。

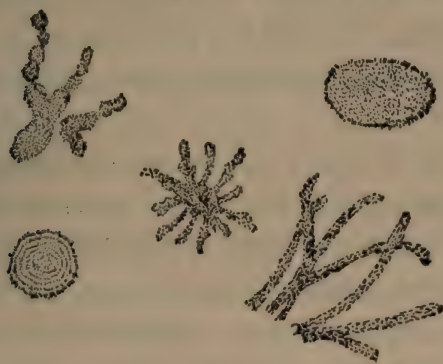


图 2-1-7 菌胶团的形状

活性污泥法的净化机理，可以归纳为三点：（1）絮凝体的形成；（2）凝聚、吸附；（3）在微生物作用下的氧化。因此活性污泥的凝聚性就成为其重要特性之一。一般说，凝聚性很好的活性污泥中存在着大量的细菌，它们具有凝聚性，能互相组成絮凝体，也就是菌胶团。关于絮凝体形成菌的研究，已取得了进展。

自从Butterfield等（1935年、1937年）从活性污泥中分离出分枝菌胶团（*Zoogloea ramigera*）以后，普遍地假定分枝菌胶团是能形成絮体的唯一细菌。随后Heukelekian等（1939年）和Wattie（1943年）也获得了支持 Butterfield 的类似结果。到60年代以后，有人还研究了分枝菌胶团的特性。由此而得出结论，菌胶团属的菌株是最重要的形成絮体的细菌。

Mckinney 等（1952年，1953年）对生活污泥中的细菌进行分离鉴定和凝聚性试验，结果发现除菌胶团属外，还有其它细菌，主要是产碱杆菌属、芽孢杆菌属、大肠杆菌属（*Escherichia*）、黄杆菌属、假单胞杆菌属以及分枝菌胶团。并认为分枝菌胶团菌是活性污泥中的优势菌种，它是活性污泥的主要凝聚因素。Dias 等也报告了菌胶团占优势的结果。

Akinorikato 等（1971年）研究含酚废水活性污泥，发现形成絮凝体的细菌有菌胶团属，假单胞杆菌属、黄杆菌属和芽孢杆菌属。而且还发现了带化病棒状杆菌（*Corynebacterium fascians*）和黄杆菌（*Flavobacterium dormitator*）为形成絮凝物的新菌种。

Tago, Y等（1975年）对分离出的分解苯酚细菌进行混合培养，发现所分离的高浓度苯酚分解菌不能自己形成絮凝体，而是掺和在被其它絮凝物形成菌所形成的絮凝物内，因此他认为这种具有苯酚分解力的絮凝体可能是由分离出的细菌联合形成的。湖北省水生物研究所等（1978年）的研究资料指出，菌胶团的形成与有机物的去除率有关，而且形成菌絮好的菌株，去除率也高。

关于絮凝物（即菌胶团）形成的机理，已提出的学说有以下

几种:

(1) 粘液学说, 认为如菌胶团属的细菌, 可以分泌明胶状的粘液物质形成荚膜而构成菌胶团。

(2) 电荷学说, Mckinney (1962 年) 认为与细胞表面电荷有关。当细菌与污水中污物结合时, 降低表面电荷会使细胞表面斥力减少, 而彼此结合成絮体。他认为特别当营养不足时, 细菌处于低能水平, 容易形成絮体。

(3) 多聚 β -羟基丁酸(PHB)学说, Crabtree 等(1965 年)假定细胞外多聚 β -羟基丁酸的积累与微生物凝聚作用有联系。Parsons 等(1971 年)研究分枝菌胶团聚合体的化学组成模型, 发现只有葡萄糖和乳糖是多聚物的成分。

(4) 纤维学说, Friedman 等(1969 年)用冰冻法作电子显微镜观察, 看到菌胶团细菌之间有纤维状聚合物相联结, 而且这种胞外纤维素易受纤维素酶水解, 致使菌胶团散开。Akinorikato 等(1971 年)的研究也获得类似的结果。

(5) Tenney (1965 年)认为活性污泥的絮凝作用, 是由于细菌处于静止期, 分泌多糖和聚氨基酸一类高分子物质相互作用而产生的。

(6) 离子结合学说, Tezuka (1969 年)认为钙、镁离子的存在对菌胶团的形成有利。

(7) 原生动物学说, Curds (1963 年)认为原生动物可以分泌多糖物质, 特别与细菌共存时有利于絮凝体的形成。

以上各种理论都有待进一步研究, 其中多聚 β -羟基丁酸学说受到人们的注意。

(三) 丝状细菌

1. 丝状菌的生物学特性

在二十年代末到六十年代中期, 许多研究者都从丝状膨胀的活性污泥中分离出了球衣细菌 (*Sphaerotilus*), 据此认为球衣菌是造成丝状性膨胀的主要微生物。PiPes (1967 年)分离出贝氏硫细菌属 (*Beggiatoa*)。七十年代一些人相继又从丝状膨胀活

性污泥中分离出埃希氏大肠杆菌 (*Escherichiacoli*)、联生白硫细菌 (*Leucothrix cohaerens*)、长细纹菌 (*Lineola longa*)等。以后还从黄杆菌属、假单孢杆菌属中获得了具有丝状性增殖的菌株。此外还有某些霉菌、酵母(*Yeasts*)和白地霉 (*Geotrichum candidum*) 等。活性污泥中几种常见的丝状菌 (图 2-1-8) 的特性介绍如下。

(1) 球衣细菌：它们的细胞呈圆柱形，排列成链状，外面有一层衣鞘，成一条丝状体，故称丝状菌。用结晶紫染色时，可以清楚地看见衣鞘里的圆柱形细胞，有时还可以看到缺位现象和假分枝。球衣菌不能独立活动，只能在尖端左右轻微摆动。以上这些都是鉴别球衣菌的重要特征。

球衣菌大多附着在其他物体 (如污泥) 上生长，所以常常与菌胶团交织在一起，成为活性污泥的骨架。

球衣菌对有机物质的氧化、分解能力很强，有的资料指出，它在一千平方米中可吸收 30 吨有机物，其中 20 吨被分解为无机物，10 吨组成有机体本身，可见适当的球衣菌对污物净化是有利的。但当它们繁殖过多时，则常常引起污泥膨胀，使废水处理效果降低，所以球衣菌是引起污泥膨胀的主要菌种之一。

球衣菌对碳素营养要求较高，反应敏感，善于利用低分子可溶性基质，对高分子碳水化合物、脂肪、蛋白质分解很慢，能利用铵盐或硝酸盐作为氮源。它虽是一种好氧细菌，但氧气多少并不是影响球衣菌生长的主要限制因素。适宜 PH 为 6~8，适宜温度为 30°C 左右，有的认为在 15°C 以下就不能繁殖。球衣菌对漂白粉等抵抗力不及菌胶团。上述这些生理特性可作为生产上控制它的重要参考依据。

(2) 白硫细菌 (又名贝氏硫细菌): 它也是由许多圆柱形细胞组成的一种丝状体，菌体大小相差很大，白硫细菌与球衣菌不同，外面没有衣鞘，能在水中自由游动。游动时，有时前进，有时后退；有时伸直，有时弯曲。

白硫细菌能分解污水中的含硫化合物，氧化硫化氢成为硫，

以硫粒积累在体内，在显微镜下极易辨认，特别加入硝酸银起黑色反应，可以清楚地看见菌体内的硫粒。当环境中氧充足，硫化氢含量低时，它就利用体内硫积粒进一步氧化，这时菌体上的硫磺颗粒就会渐渐消失。



图 2-1-8 几种丝状菌的形态

这类菌对污水净化没有明显作用，也不是造成污泥膨胀的主要菌种。

(3) 丝硫细菌:它也是一种常见的丝状细菌,具有衣鞘,由许多细长圆柱形菌体排列于衣鞘内,但没有假分枝。这类菌丝体的基部具有固着器,附着在菌胶团上生长。丝硫菌是出现在通气不良、含硫化氢较多的污水中,当它大量繁殖时,会使污泥结构松散,引起污泥膨胀。

丝硫菌也和白硫细菌一样,同属于硫磺细菌,当充氧不足时氧化硫化氢为硫,积于体内,而当溶解氧较高(大于1毫克/升)时,体内硫粒消失。因此通过对硫磺细菌体内硫粒的观察,可以间接地推测水中溶解氧的状况。

铁细菌和真菌一类的丝状菌,有的是在给排水管道方面有破坏作用,有的是在活性污泥中出现,但数量较少,所以就不专门介绍,可参考有关资料。

2. 丝状菌与污泥膨胀

在活性污泥法处理废水中,当活性污泥变质时,污泥沉淀性能恶化,含水率上升,体积膨胀,澄清液少,这种现象称为污泥

膨胀。它是用活性污泥法处理废水时，同胶团形成相关的一个最麻烦的问题，目前正在探讨之中。有关的几个问题简要说明如下：

（1）污泥膨胀的种类：

关于污泥膨胀，大致可以分为两类：

1）丝状体膨胀。目前在活性污泥法处理废水时，所遇到的膨胀几乎都是由丝状菌繁殖而产生的。应用显微镜观察膨胀的活性污泥，几乎所有的场合都发现有丝状菌增殖，这些丝状菌互相缠在一起，妨碍污泥浓缩。看到的典型丝状菌是球衣细菌，此外还有芽孢杆菌属、贝氏硫细菌属、丝硫细菌属、白地霉和大肠杆菌等等，也可发现少量酵母。丝硫细菌属与贝氏硫细菌属都与废水中硫化物有密切关系，在工业废水处理中所观察到的膨胀现象几乎都是由球衣菌属造成的。

2）非丝状体膨胀。这种主张认为菌胶团能使污泥产生膨胀现象，认为污泥膨胀是由于活性污泥生物平衡突遭破坏的一种现象，是污泥、食料和供氧三要素发生紊乱变化。这种破坏，首先影响细胞基质（matrix）的生物物理性质、降低了吸附能力，形成了轻的绒粒。另一方面，由于生物平衡被破坏，球衣菌属也行增殖，这些丝状生物与轻质的绒粒相结合，更助长了污泥的膨胀现象。也就是说，球衣菌属的存在并非使污泥产生膨胀的首要因素。

也有人认为在低负荷时，是由于未氧化污泥被破坏，比重减轻所致；在高负荷时，则由于丝状生物存在所致。

总的说来，尽管污泥膨胀可分为丝状和非丝状菌膨胀，但大部分的情况下，当SVI增高时，几乎都出现丝状生物，而且SVI值越高，其增殖越剧烈，即为丝状菌性膨胀。

有的研究指出， 10^7 微米/毫升左右的丝状体浓度（长度），可以作为丝状体膨胀与非丝状体膨胀的分界点。当丝状体浓度低于 10^7 微米/毫升时，就出现非膨胀污泥，而高于 10^7 微米/毫升，则出现丝状膨胀污泥。

（2）污泥膨胀的原因：

关于丝状菌引起污泥膨胀的原因，至今还没有确凿的解释，从现今提出的一些探讨性意见来看，有以下几方面因素：1) 废水中含有高浓度碳水化合物；2) 含有容易被微生物代谢的低分子可溶性有机物；3) 微生物承受有机负荷太高；4) 废水净化所需要的氮、磷不足；5) 含有对菌胶团具有选择性毒性的物质；6) 废水的流量、组成发生急剧变化，以及 pH，水温和溶解氧等环境因素造成污泥的膨胀。

丝状菌膨胀机理假说很多，如脂肪性活性污泥假说，选择毒性假说，原生动物假说，细菌之间的平衡假说和丝状菌比表面积假说等。PiPes将这些假说作了汇总，他指出，由于丝状细菌的比表面积（生物体的表面积 A / 生物体的体积 V ）比菌胶团大，因此在运行中，如果存在控制微生物繁殖因子，当菌胶团与球衣菌属相争夺时，球衣菌属占有利地位。这个 A/V 假说还可以说明可溶性基质、氮与磷缺乏现象以及对氧的争夺等情况。

一旦由于丝状菌恶性繁殖引起膨胀时，常常会给运转带来很多麻烦，如不加控制，会前功尽弃，通常控制丝状菌的方法如投加有毒化学药剂（氯和过氧化氢）、含氮化合物、石灰、消化污泥或稀释流入污水等。

关于活性污泥中细菌在分类学上的位置，可参考附录二。

四、污泥消化微生物学

厌气消化也是一个生物作用的过程，是在厌气情况下，利用厌气细菌的作用，把废水和下水污泥中的有机物转变成甲烷和二氧化碳。这种方法通常称为甲烷发酵法或污泥消化法。它与活性污泥法一样，都是二十世纪初作为处理废水的方法而被发展起来的。由于这一过程比较复杂，所以用于工业废水处理只不过是近年来的事。一般都是对高浓度的有机废水先进行厌气法处理，然后再进行好气法处理。

厌气消化一般包括两个阶段的过程，即酸的形成（液化）和气的形成（气化）。Lawrence 和 Mc Carty (1967年) 认为将这一过程分为水解、酸的形成和气的形成三个阶段。为了使有机质全部

转变为甲烷和二氧化碳,至少需要两个大的生理上不同的细菌群落。在第一阶段,不同的微生物群将蛋白质、糖类和类脂物质通过水解和发酵作用大部分转变为脂肪酸。在第二阶段,由生理上独特的严格专性厌氧细菌群(叫做甲烷细菌),将第一阶段微生物代谢的最终产物转变为甲烷和二氧化碳。Toerien等(1969年)指出第一阶段最终代谢产物不仅是酸,而且厌氧消化所形成的气并不都是从第二阶段产生的。因此他们认为应将酸形成或液化作用称为不产生甲烷阶段,而气形成或气化作用应称为产生甲烷阶段。

厌氧处理法应用虽已很久,但对其中生物学问题研究尚不透彻。Toerien等(1969年)详述了厌氧消化的微生物学工作,综合了产酸(不产甲烷)和产气(甲烷)两个主要阶段的细菌种类、数量和代谢资料。根据这个资料来看,在厌氧消化的产酸(不产甲烷)阶段的不同微生物的生理群已被揭示,并进行了一些纯培养的研究。这些资料表明,在厌氧消化产酸阶段的生物群落组成尽管有细菌,原生动物和真菌的存在,但起决定作用的还是细菌。根据资料统计细菌有18个属,50多种。这些不产甲烷(产酸)细菌有气杆菌属、产碱杆菌属、芽孢杆菌属、拟杆菌属(*Bacteroides*)、梭状芽孢杆菌属(*Clostridium*)、埃希氏杆菌属、克氏杆菌属(*Klebsiella*)、细螺旋体属(*Leptospira*)、小球菌属、副大肠杆菌属、奈氏球菌属(*Neisseria*)、变形杆菌属(*Proteus*)、假单胞杆菌属、八叠球菌属、红极毛杆菌属(*Rhodopseudomonas*)、链球菌属(*Streptococcus*)等。而且专性厌氧不产甲烷菌的数目一般为每毫升 $10^6 \sim 10^8$ 个。

Zajic(1971年)的综合资料指出,不同基质废物,微生物群系类型不同。当纤维素物质存在时,从厌氧消化池中分离出了蜡状芽孢杆菌(*Bacillus cereus*)、巨大芽孢杆菌(*Bacillus megatherium*)、粪产碱杆菌(*Alcaligenes faecalis*)、普通变形杆菌(*proteus vulgaris*)、铜绿色假单胞杆菌(*pseudomonas aeruginosa*)、细螺旋体属、食爬虫假单胞菌(*ps.reptilovora*)和核黄素假单胞菌(*ps.riboflavina*)等。当淀粉物质存在时,

亮白微球菌 (*Micrococcus candidus*)、易变异小球菌 (*Micrococcus varians*)、尿素小球菌 (*M. ureae*)、蜡状芽孢杆菌、巨大芽孢杆菌和假单孢菌属的许多种生长较好。在有较高含量蛋白质的废物消化中,以蜡状芽孢杆菌、环状芽孢杆菌 (*Bacillus circulans*)、球形芽孢杆菌 (*B. coecoides*)、枯草芽孢杆菌 (*B. Subtilis*)、变异小球菌、埃希氏大肠杆菌、副大肠杆菌和假单孢菌属的一些种生长较好。同时在消化池中,植物油(如向日葵油)能促进小球菌属、芽孢杆菌属、链球菌属、产碱杆菌属和假单孢菌属的生长。并认为丝状真菌在消化池中似乎只有很小的功能,它们可能参与有机酸和醇的形成过程。

由上述资料可以看出,不产甲烷阶段的细菌包括范围很广的生理群,但不同的研究者所分离到的不同细菌,在消化过程中是否是在生理上都是重要的,尚待进一步研究和测定。Zajic (1971年)将一些产生有机酸的细菌特性和作用概括于表2-1-4。

在厌气性处理法的第一阶段,也就是所谓产酸阶段(不产甲烷)的微生物的主要作用是把污水或下水污泥中的碳水化合物、脂肪、蛋白质等复杂的有机物分解为乙酸、乳酸等低级的脂肪酸和乙醇等。Toerien等(1969年)综合许多研究者的结果指出:不产甲烷细菌代谢形成的主要最终产物是醋酸、丙酸和丁酸,也可能是蚁酸和乳酸。这些产物是甲烷细菌生长的能量来源。因此不产甲烷阶段最终代谢产物的变化将直接影响到甲烷细菌群落的变化,甚至扰乱整个消化池的动态平衡。

关于厌气消化过程的产气(甲烷)阶段的微生物,虽然曾进行了很多研究,但迄今为止对于甲烷细菌和它们的特性仍不十分清楚。根据Toerien等(1969年)的综合资料来看,已经从不同来源进行分离和纯培养的甲烷细菌大约十多种,其中自消化污泥中分离出的甲烷细菌共6种。甲烷细菌在自然界中分布很广泛,如在普通花园土中、黑泥中、沼泽、池塘、湖泊及食草动物的瘤胃,以及下水道污物和它的处理过程中,都可以找到甲烷细菌,而且认为在厌气消化器内产生甲烷细菌的数目可能也是每毫

表 2-1-4 产生有机酸的微生物

微 生 物	pH	温度 (°C)	产 物
蜡状芽孢杆菌 (<i>Bacillus Cereus</i>)	5.2	25~35	乙酸、乳酸
克尼费哈皮芽孢杆菌 (<i>B. Knelfe lkampi</i>)	5.2~8.0	25~35	乙酸、乳酸
巨大芽孢杆菌 (<i>B. megaterium</i>)	5.2~7.5	28~35	乙酸、乳酸
产琥珀酸拟杆菌 (<i>Bacteriodes Succinogenes</i>)	5.2~7.5	25~35	乙酸、琥珀酸
<i>Clostridium Carnofoetidum</i> (一种梭菌)	5~8.5	25~37	
产纤维二糖梭菌 (<i>Clo. Cellobioparus</i>)	5~8.5	36~38	甲酸、乙酸、乳酸 乙醇、CO ₂
溶解梭菌 (<i>Clo. dissolvens</i>)	5~8.5	35~51	甲酸、乙酸、乳酸
<i>Clo.ridium thermocellulaseum</i> (一种梭菌)	5~8.5	55~65	甲酸、乙酸、乳酸、 琥珀酸
甲酸假单胞菌 (<i>Pseudomonas formieans</i>)	33~42	甲酸、乙酸、乳酸、 乙醇、琥珀酸
生黄瘤胃球菌 (<i>Ruminocossus flavefaciens</i>)	33~38	甲酸、乙酸、琥珀酸

升 $10^6 \sim 10^8$ 个, 这和第一阶段的产酸细菌数目接近相等。这可能就是厌氧消化系统中相对平衡作用的本质所在。

Zajic (1971 年)对甲烷细菌作了比较明确和概括的说明, 指出专门产生甲烷的细菌有: 产甲烷杆菌属(*Methanobacterium*)、甲烷芽孢杆菌属、甲烷八叠球菌属 (*Methanosarcina*) 和甲烷球菌属 (*Methano coccus*), 并将产气阶段的甲烷细菌及作用列于表2-1-5。

为了进一步了解甲烷细菌的特性, 根据 R.S.Wolfe (1971 年) 等的综合文献资料, 对一些甲烷细菌作一简略介绍。

1. 奥氏甲烷杆菌

菌体呈杆状, 大小为 $0.6 \sim 0.7 \times 1.5 \sim 10$ 微米, 通常 3~6 微

表 2-1-5 甲烷细菌

微生物	pH	温度	代谢的酸
奥氏甲烷杆菌 (<i>Methanobacterium Omelian-skii</i>)	6.5~8	37~40℃	CO ₂ 、H ₂ 、乙醇伯醇和仲醇
丙酸甲烷杆菌 (<i>M. propionicum</i>)			丙酸盐
甲酸甲烷杆菌 (<i>M. formicicum</i>)			H ₂ 、CO ₂ 、甲酸盐
<i>M. Suboxydans</i>			丁酸盐、己酸盐、戊酸盐
反刍甲烷杆菌 (<i>M. ruminantium</i>)			
孙根氏甲烷杆菌 (<i>M. Soehngenii</i>)			乙酸盐、甲酸盐
文氏甲烷球菌 (<i>Methanococcus Vanneillii</i>)	7.4~9		甲酸盐
马氏甲烷球菌 (<i>M. mazei</i>)		30~37℃	乙酸盐、丁酸盐
甲烷八叠球菌 (<i>Methanosarcina</i>)		35~37℃	乙酸盐、丁酸盐
巴氏甲烷八叠球菌 (<i>M. barkerii</i>)	7.0	30℃	CO ₂ 、H ₂ 、乙酸盐 甲醇

米。芽孢端生，球形，膨大成芽孢囊，运动能力弱，革兰氏染色不定。pH 6.5~8，适宜温度为 37~40℃，是专性厌氧菌。目前认为这个种应列于芽孢梭菌属中，作为一个特殊的类型。奥氏甲烷杆菌能将伯醇（乙、丙、正丁、正戊醇）氧化为脂肪酸，将仲醇（异丙、第二丁醇）氧化成酮，也氧化氢气。利用这些氧化作用将 CO₂ 还原成甲烷，以氨氮为氮源。近年来有的研究认为这种菌不是一个纯培养，而是两种细菌的共生的联合。假如真正如此，有关这一菌种的生理研究结果就需要重新评价。

2. 甲烷八叠球菌

此菌大小1.5~2.5微米，革兰氏染色正反应，连结成四个，八个或更多。能利用氨。能分解丁酸等产生甲烷和 CO_2 。最适宜温度为35~37°C。巴氏甲烷八叠球菌能够从甲醇、乙酸盐以及由于 CO_2 还原作用产生甲烷。最适宜pH为7，最适宜温度为30°C，是从黑泥中分离出来的。

3. 马再氏小球菌

细菌呈小球形，单个或成堆，有荚膜，易为藻红着色，适温30~37°C，革兰氏染色不定，是化能异养厌气菌。能发酵甲酸、乙酸、丁酸等产生甲烷。

4. 甲酸甲烷杆菌

这是一种杆菌，多为不规则的、弯曲的杆状体，革兰氏反应不一，能从甲酸盐（蚁酸盐）和由于 CO_2 还原作用产生甲烷，生活于污泥中。

5. *Methanobacterium Suboxydans* (一种甲烷杆菌)：这是一个细小、运动很慢的曲杆状细菌，是在基质为脂肪酸时进行甲烷发酵的，能发酵己酸、戊酸和丁酸并产生乙酸盐和甲烷。

6. 丙酸甲烷杆菌

此菌是能运动的，短杆状到球形的甲烷杆菌，它能利用丙酸盐使丙酸氧化，从而引起 CO_2 的还原，形成甲烷。

文氏甲烷球菌 (*Methanococcus Vanneillii*) 也是一种能运动的甲烷球菌，生长最快。

纯培养的甲烷细菌有各种各样的细菌形态类型。*Smith*(1966年)从污泥中分离出甲烷细菌，从他分离出的细菌的相差显微照相说明了甲烷菌的形态类型。图2-1-9所示的甲烷球菌 (*Methanococcus*) 表明其球菌形态。图2-1-10为反刍甲烷杆菌 (*Methanobacterium ruminantium*)，是串链状球菌。图2-1-11为同样的球菌，但细胞较小。图2-1-12为巴氏甲烷八叠球菌 (*Methanosarcina barkeri*) 的八叠球菌。图2-1-14为甲酸甲烷杆菌 (*Methanobacterium formicicum*) 的杆状菌。图2-1-13和图2-1-15为一

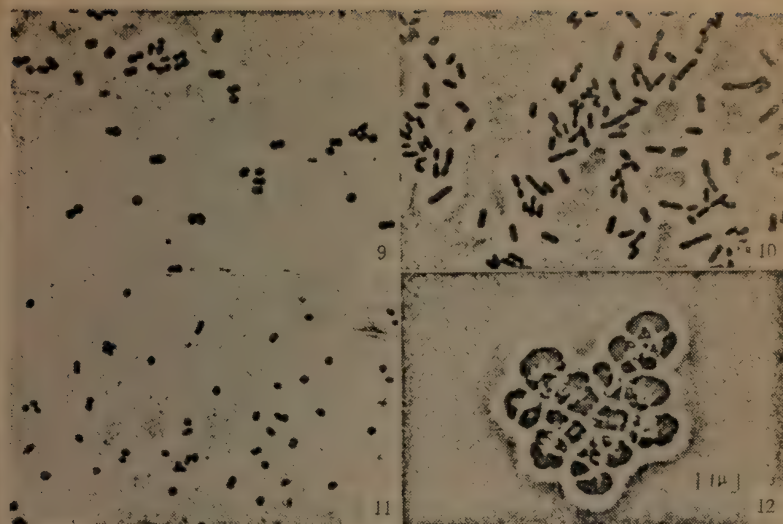


图 2-1-9~2-1-12 几种甲烷菌的形态 (一)

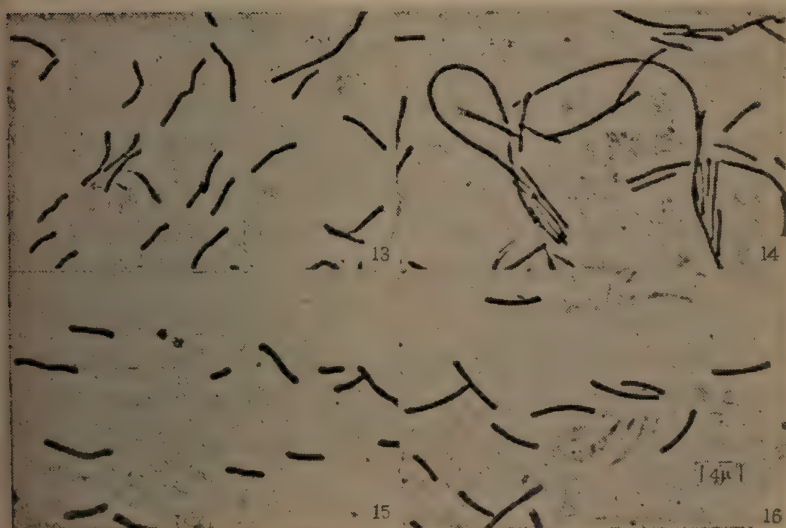


图 2-1-13~2-1-16 几种甲烷菌的形态 (二)

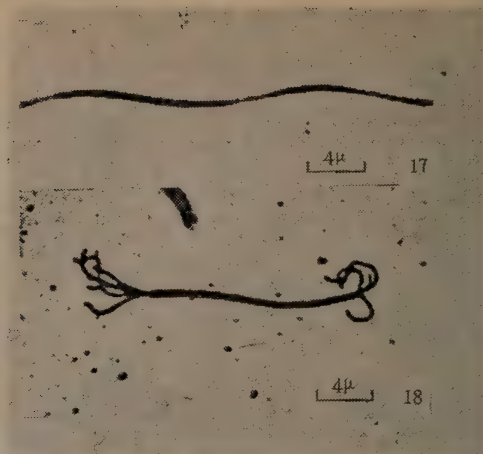


图 2-1-17~2-1-18 几种甲烷菌的形态 (三)

种甲酸甲烷杆菌的类型和甲烷杆菌 (*Methanobacterium* M.O. H.). 图2-1-16为甲烷螺旋菌 (*Methanospirillum*) 的长波浪螺旋体。图2-1-17为甲烷螺旋菌更为明显的螺旋形态, 其鞭毛染色可看到鞭毛极簇 (图2-1-18)。

图2-1-9~2-1-18均系引自 R.S.Wolfe (1971年) 关于《甲烷的微生物形成》一文。而且Wolfe还对1970年以前的甲烷菌纯培养做了总结, 现将他所综合的纯培养的各种甲烷菌及其栖息地、形态学、营养和底物列于表2-1-6。由表可见, 除巴氏甲烷八叠球菌外, 对底物的要求都很严格, 不是氢和二氧化碳, 就是甲酸盐, 而甲酸盐又可转变为氢和二氧化碳。作为这类细菌的主要氮源是铵离子, 有的菌种需反刍胃液中的未知生长因子。醋酸盐对许多菌种有高度的刺激作用, 而2-甲基丁酸对于有的细菌形成支链碳架是需要的。从不同地方分离的同种细菌的不同菌株之间, 观察到有很小的营养差异。

五、细菌在废水处理中的作用

1. 活性污泥中好气性异养菌的数量

表 2-1-6 1970年纯培养的甲烷菌的类型⁽¹⁹⁸⁾

菌 名	来 源	形 态 学	革 兰 氏 反 应	底 物	营 养 需 要		
					氮	维 生 素	其 它
反刍甲烷杆菌	瘤 胃	球形至短杆链状	+	H ₂ + CO ₂ 甲酸盐	NH ₃	瘤胃液中的生长因子	醋酸盐, 2-甲基丁酸盐
反刍甲烷杆菌	污 泥	同 上	+	H ₂ + CO ₂ 甲酸盐	NH ₃	不需上述生长因子, B族维生素有刺激作用	醋酸盐
甲烷杆菌* M.O.H. 株	奥氏甲烷杆菌	不规则的弯曲杆状体	不一	H ₂ + CO ₂ (不需甲酸盐)	NH ₃	B族维生素有刺激作用	醋酸盐有刺激作用
甲酸甲烷杆菌	泥浆、污泥	不规则的弯曲杆状体	不一	H ₂ + CO ₂ 甲酸盐	NH ₃	(?)	(?)
活动甲烷杆菌 (<i>M. mobilis</i>)	瘤 胃	短杆形活动	-	H ₂ + CO ₂ 甲酸盐	NH ₃	瘤胃液中的生长因子	(?)
巴氏甲烷八叠球菌	泥浆、污泥	八叠球菌	+	H ₂ + CO ₂ 甲酸醋酸盐	NH ₃	无	无
文氏甲烷球菌	泥 浆	活动球菌	(?)	H ₂ + CO ₂ 甲酸盐	NH ₃	无	无
甲烷螺旋菌属的一种 (<i>Methanospirillum</i> , Sp.)	污 泥	螺旋形	+	H ₂ + CO ₂ 甲酸盐			
甲烷球菌属的一种 (<i>Methanococcus</i> , Sp.)	污 泥	球 形	+	H ₂ + CO ₂ 甲酸盐			

* 此菌株是 Bryant 从奥氏甲烷杆菌中分离出来的。

据 Pike (1972 年) 报导, 传统活性污泥法混合液中菌数为 4.9×10^7 个/毫升, 高效活性污泥法混合液中菌数为 2.4×10^8 个/毫升; Prakasam 等 (1967 年) 对不同处理场的活性污泥混合液用各种方法测得的菌数在 $10^6 \sim 10^8$ 个/毫升的范围内。湖北省水生生物研究所等测定印染废水活性污泥混合液菌数列于表 2-1-7。

表 2-1-7 活性污泥细菌定量测定结果⁽¹³⁾

采样日期	水样菌数 (QW, 10^7 个/毫升)	泥样菌数 (QS, 10^7 个/毫升)	QS/QW	混合液菌数 (QML, 10^7 个/ 毫升)	挥发性污泥菌数 (QVSS, 10^{11} 个/毫升)
5月20日	1.9	453.2	239	180	3.2
6月3日	3.1	267.4	86	129	5.2
6月19日	6.0	59.5	10	41	0.8
7月30日	1.3	80.6	62	55	2.6
8月2日		64.3			1.9
8月3日	1.8	120.0	67	40	1.9
8月6日	0.1	90.5	905	57	1.9

从所测结果来看, 5月20日正常运转条件下的水样菌数为 2×10^7 个/毫升; 泥样菌数为 450×10^7 个/毫升, 混合液菌数为 180×10^7 个/毫升。其他各项的混合液菌数也在 $40 \sim 130 \times 10^7$ 个/毫升的范围内。由此可见活性污泥中的菌数基本上比较一致。各个研究者所测数据间的差异主要是研究方法不同所致。如与活性污泥中原生动物数量 ($5000 \sim 20000$ 个/毫升) 相比, 可以看出细菌数量之多了。这在一定程度上也说明细菌在污水处理中的重要作用。当然这种作用远不止数量上的关系, 还有不同微生物的生理代谢功能方面的反应。

2. 细菌的净化作用

在废水生物处理中将有机物分解为无机物, 起净化作用的主要是细菌。在自然界中细菌、真菌去除有机物质的能力是很大的。前边说过, 例如丝状菌——球衣菌在一千平方米中可吸收30

吨有机物质，其中20吨被分解为无机物质，10吨组成有机体本身。在活性污泥中一般细菌能利用废水中50%左右的有机物质。成絮细菌和游离细菌二者均有分解能力。成絮菌中有许多是菌胶团，粘性很强，能将废水中的大量悬浮有机物吸附在其表面，然后通过细菌酶的活动加以分解利用。各种细菌分解能力也有很大差异。有的能分解复杂的高分子物质，并摄取以供自己的增殖；也有的不能分解高分子物质，而只能摄取单纯的有机物用以增殖。例如活性污泥中的枯草杆菌能把淀粉等高分子的糖类分解而充分增殖；而浮游球衣细菌（*Sphaerotilus natans*）不能分解淀粉，只能分解葡萄糖这样的单糖类以供营养和增殖。工业三废中的有毒物质也可以被微生物分解。如无色杆菌，产碱杆菌加到活性污泥中处理含氰、腈废水获得显著效果，这一方面研究资料较多。

废水生物处理过程，是一个复杂的生物化学过程，也是许多生物共同作用的结果。北京市环境保护科学研究所（1978年）曾报告了生物膜在净化过程中有非常显著的作用。在试验开始二小时后，加生物膜的酚、氰的去除率分别为99%和70%，与此同时对照组（无生物膜）对氰的去除率仅为23%。而且发现生物膜中酚、氰含量在试验前后无明显的变化，这说明生物膜在酚、氰净化过程中，对这两种物质没有积累作用，而是将它们分解为其它成分，使污染物质得到了净化。他们还研究了浮游球衣细菌对酚、氰的去除能力，结果表明球衣菌对酚有很强的去除能力，在浓度30毫克/升的含酚培养基中去除率为89%。对氰也表现出较高的去除效果，在氰浓度2毫克/升的培养基中，去除率为60%（表2-1-8）。进一步以 ^{14}C 标记氰根，测定球衣菌试验组与对照组的放射性比强，从试验结果可以看出试验组放射性比强明显的降低（表2-1-9）。这些结果说明球衣菌对废水净化的重要作用。

细菌除直接去除分解有机物外，有的细菌还能形成絮凝体，这种胶状颗粒能够吸附、氧化分解有机物，这一问题已在本章第三节中讲过了，此处不再赘述。此外，细菌还有指示作用，一方

面指标水体污染状况；另一方面菌胶团的形成也可以反映活性污泥培养的情况。总之细菌在水处理过程中的作用是多方面的，很多问题还有待进一步去研究。

表 2-1-8 球衣菌对不同浓度酚、氰去除实验^[13]

	起始浓度 (毫克/升)	实验组 (加纯种球衣菌)		对 照 组 (不加纯种球衣菌)		实验组实 际去除率 (%)
		五小时后浓度 (毫克/升)	去 除 率 (%)	五小时后浓度 (毫克/升)	去 除 率 (%)	
氰	2	0.6	70	1.8	10	60
	6	5.2	46.66	5.4	10	36.66
	7	5.0	25.71	6.25	10	15.71
酚	3.3	0	100	3.3	0	100
	5.5	0	100	5.5	0	100
	22	2.05	90.6	22	0	90.6
	30	3.3	89	30	0	89

表 2-1-9 放射性比强*的测定^[13]

测 定 时 间	对 照 组	球 衣 菌 试 验 组
0.5	1232	1288
1.5	1458	850
2.5	1383	844

* 强度0.1毫升水样次/100秒。

六、废水生化处理方面几个值得探讨的问题

1. 遗传工程在水处理中的应用

遗传工程是70年代初获得成功的，它是在分子生物学，特别是分子遗传学和微生物遗传学的基础上发展起来的一门新兴学科，主要是利用了内切酶、质粒和有关技术，进行基因实现DNA（脱氧核糖核酸）的重组。也就是按照人们的意愿把有机体中一种专门特性的基因取出来，转移到另一个生物体中去，构成一个具有新遗传性的生物类型。这种用人工移植并转化遗传基因的方法

就叫做遗传工程或基因工程。这种方法为定向地改造生物遗传性，创造所需要的生物新品种，开辟了新的途径。目前，在废水处理研究方面比较突出的有以下几点。

(1) “超级细菌”对海面浮油的去除：海洋中的污染物质很多，但污染数量最多、范围最广的是石油污染。它不仅影响海洋生物的生长，降低海滨环境使用价值，破坏海岸设施，还可能影响整个气候的变化，降低海洋自净能力。因此，消除海上浮油引起了世界各国的极大重视，并作了大量的理论研究工作。最近，国际上应用微生物消除油污染的研究非常活跃。截至目前已发现90多种微生物，可以通过生物氧化作用降解石油，但自然菌种消除海面浮油速度缓慢，可能主要与石油在水中溶解度低和微生物缺乏某种酶功能的缘故。七十年代美国生物学家 Chakrabarty 等对假单孢杆菌属不同种分解烃类化合物的遗传学做了大量工作，发现假单孢杆菌属的许多细胞质里带有小环状 DNA（质体），它们控制着烃类化合物分解的酶系合成，称此类质体为分解质体。为了提高细菌消除浮油的能力，Chakrabarty 应用质体工程技术，分别把分解芳烃质体，分解萜烃质体和分解多环芳烃质体转移到降解脂烃的一种假单孢杆菌中去（图 2-1-19），从而实现了人工创造出一种多质体的新菌种，又称多质体“超级细菌”，这种细菌可以同时分解多种烃类化合物，把原油中三分之二的烃消除掉，比其它任何已知微生物降解烃的速度快、效率高，现已获得美国专利。然而，在实验条件下这种多质体菌株不论混合培养或单独培养是困难的。但 Chakrabarty 认为，一旦提供氮素或通过肺炎克氏杆菌 (*kl.pneumoniae*) nif^+ 嵌入到 mpp 中去，可以提高杂菌的生存力。

(2) 重金属汞微生物转化的遗传控制：日本和瑞典对汞的微生物转化做了大量的研究，提出了汞化合物转化途径。受汞污染的河系，由于微生物所引起的汞甲基化，使元素汞转化为甲基汞，加剧了河流、湖泊的汞害。但自然界也有一些抗汞微生物，目前已发现从环境中消除汞的细菌有大肠杆菌、金黄色葡萄球菌

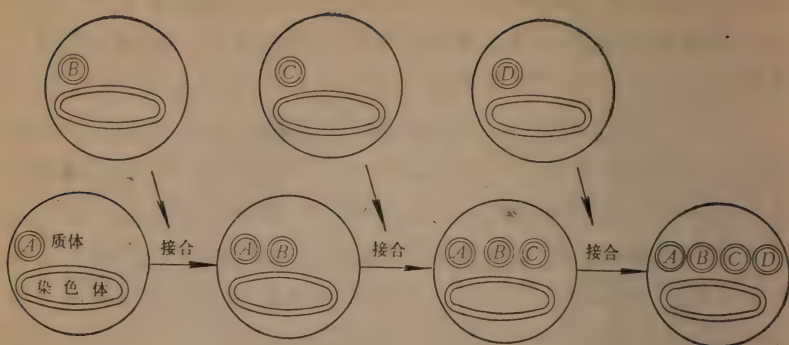


图 2-1-19 四种不同降解质体接合在同一受体假单胞杆菌中的模式图

和某些假单胞杆菌，它们的抗汞基因在质体或抗药因子（R因子）上。Chakrabarty 采用质体转移技术把一种耐汞质体（即MER质体）从嗜油假单胞杆菌转移到恶臭假单胞杆菌（*Pseudomonas putida*）中去，带MER质体的恶臭假单胞杆菌具有抗高浓度汞的能力，可以在50~70微克/毫升氯化汞中生长（通常，恶臭假单胞杆菌在超过2微克/毫升汞浓度时就会中毒死亡）。有的人提出用遗传工程新技术发展对贵金属有特别亲合力的菌种，这对分离和纯化各种贵金属等有着重要的意义。

（3）农药等有害物质的遗传控制：近年来，发现某些细菌对化学农药2,4-D具有降解能力，这种降解能力受细菌质体控制，把这些具有降解能力的细菌质体与R因子实行重组，有可能获得更有价值的降解特性。

在污染大气中含有致癌物质3,4-苯并芘，人们设想如果能利用遗传工程原理，制造一种具有降解3,4-苯并芘的新菌种，对于预防癌症是很有希望的。

2. 关于固相酶技术及其在废水处理中的应用

酶在水处理中的作用日益被人们所重视，国外用酶制剂净化工业废水的工作进展很快，从菌种筛选、酶的制取和纯化，酶的

活力测定和实际应用，以及酶动力学研究等方面都取得了显著成绩。现在日本、美国和瑞士等国正在研究把固定化酶制成酶布、酶片、酶粒、酶粉和酶柱处理工业废水。其优点是：（1）可以连续使用；（2）性能稳定；（3）处理能力强。

用固相酶净化工业废水的方法，是把不溶酶固定在各种载体上，将载体表面与污水接触，通过有机物的共聚作用，固定有机分子键的末端；回收不溶酶，载体上的酶可以进行连续使用。一般处理动态水时，根据废水的性质和排水量，可选用玻璃酶或塑料酶柱，并确定酶柱的高度和内径。选用各种类型的晶体酶，如粉状酶、酶布和酶沙，并把它们放入酶柱内。也可根据水的性质，配成多酶柱来完成一系列反应，如将脱氰酶、脱酚酶可同时放入一个酶柱内，达到同时去除氰、酚的效果。处理净态水时以酶布和酶片为宜。日本利用脱氰固相酶柱处理初始浓度达 100~200 毫克/升的含氰废水，可将氰全部分解完。据报导，还有用脂肪酶、蛋白酶、纤维素酶等混合酶处理生活污水。为了降低水中病毒和细菌，有人曾研究把溶菌酶、核酸酶固定多孔玻璃和陶器材料上，去除病毒和细菌以提高出水水质。

总之，固相酶的研制成功及其广泛应用，是一项重大的技术革新。用固相酶和固定化微生物净化工业废水刚刚开始，但为废水处理展示了广阔的前景。

3. 关于生物膜的研究

生物膜是由微生物群体组合的粘状物，在污水生物处理中起着主要的作用。生物膜生长在固体的表面，多由丝状菌组成。过去对膜的概念侧重于描述其中的生物群落组成，如有那些微生物，有些什么原生动物等等。近年来，除生物滤池外，在生物转盘、生物接触氧化法，流化床等工艺中都是以生物膜为主要形式的生物处理构筑物。因此，对生物膜的结构，物质代谢机理和动力学，必须作进一步的研究，以指导构筑物和工艺条件的改进。

（1）生物膜的形成和发展：成熟的生物膜的结构如图（2-1-20）所示。

生物膜成长过程是：1) 当营养和溶解氧充足时，微生物在填料表面繁殖，产生胶质粘膜包在填料表面，随微生物不断增长，逐渐在填料上形成很薄的膜层。2) 一旦膜长到一定厚度，氧向内层扩散受限制时，生物膜开始分层。表面为好气层，内层为厌氧层。3) 随着厌氧条件继续发展，则膜的内层养分耗尽，促使附着在填料表面的厌氧微生物大量死亡和溶解直至生物膜瓦解，大块脱落，在脱落处又开始生物膜的二次更新。

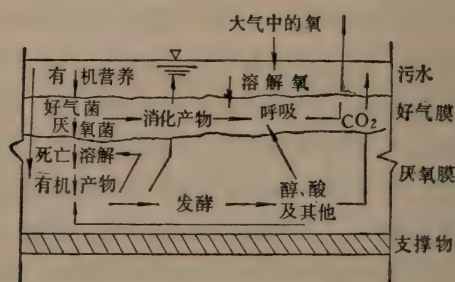


图 2-1-20 成熟生物膜群落结构和代谢的概念

(2) 生物膜发展过程的概念：生物膜发展的过程如图2-1-21所示：(a) 表示生物膜处于初生阶段，稀疏的细菌附着于填料表面，逐渐形成胶质粘膜，此时膜的密度很低〔单位体积湿生物膜被烘干(103°C)后的重量，单位为毫克/厘米³〕；(b) 和 (c) 表示细菌生长加速了，营养和氧都不缺乏，此阶段膜密度迅速增加；(d) 表示氧供应受到限制，内层好气菌开始死亡，少量厌氧菌生长。好气菌溶解所提供的养料为尚生存的微生物所吸收，导致膜密度降低，细菌继续减少，这种情况可视为微生物群体的内呼吸的形式；(e) 表示兼性和厌氧性微生物开始适应新环境，以最大速度生长，消耗养料，膜密度下降速度减缓；(f) 表示好气菌死亡速度，兼性和厌氧菌生长速度达到稳定阶段、膜密度稳定；(g) 表示稳定阶段一直延续到内层营养贮备耗尽为止，生物膜结构的完整性已丧失，发生大块脱落，或由于厌

气气体产物在内层积累，把膜顶起，发生膜的大块脱落。

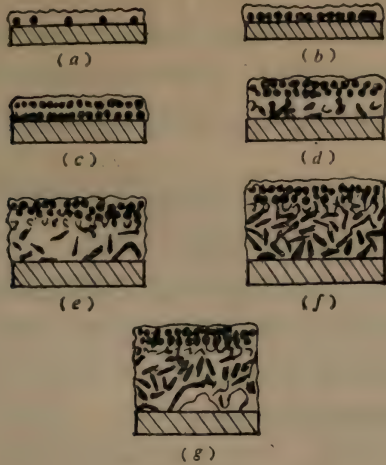


图 2-1-21 生物膜的发展过程示意图

图2-1-22是根据实践观测结果，表示生物膜密度、厚度和发展阶段间的相互关系。

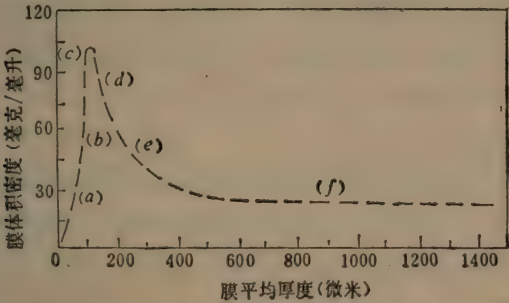


图 2-1-22 生物膜密度、厚度与发育阶段之间的关系

这些研究的意义在于进一步发展了生物膜的结构与作用关系的概念，提供了一个清晰的生物膜发展图象。尤其是膜厚度与代谢速度关系的规律，对实际应用有较大的指导意义，即在一定条件下，当膜达到一定的厚度之后代谢速度趋于稳定，过厚则引起

反作用。当然在实际构筑物中（如塔式生物滤池、接触氧化池），膜在各部分是不同的（包括厚度、密度和微生物组成）。

此外，关于活性污泥与厌氧消化作用的生物化学机理以及高效分解菌的选育等问题的进一步研究，都将有助于提高废水生化处理的效率，对环境保护的生物防治也具有重要的意义。

第二章 微型生物与环境保护

一、原生动物的类群和特征

原生动物(Protozoa)也称原虫，它在活性污泥净化中的作用尚未定论，但作为评价活性污泥质量优劣的指标，已被广泛地应用。因此有必要对原生动物的微生物学性质加以了解。

(一) 原生动物的类群

根据器官构造特征，将原生动物划分为五纲，即鞭毛虫纲、纤毛虫纲、肉质虫纲、吸管虫纲和孢子虫纲。

1. 鞭毛虫纲 (Mastigophora)

本纲原生动物有1~2条鞭毛，它和细菌的鞭毛基本相同。这一类原生动物有的体内含有色素，能进行光合作用，如拟黄团藻、黄群藻等属于植鞭毛虫类；有些种类是以吸收有机物为养料，污水中出现的一些鞭毛虫大都是腐生性的无色鞭毛虫，这类鞭毛虫属于动鞭毛虫类。

2. 纤毛虫纲 (Ciliata)

纤毛虫类具有由鞭毛演化而成的无数短纤毛，借以在液体中运动和摄食。这一类原生动物可分为游动型和固着型两类，前者如草履虫，周身有纤毛；后者如钟虫，只在口缘周围长有纤毛。游动型活动能力大，消耗的能量多，所以比固着型的胃口大得多。

3. 肉质虫纲 (Sarcodina)

本纲最大特点是它们的身体裸露，无有坚硬的膜所包裹。没有鞭毛或纤毛，常形成原生质突起——假足，以此来运动、摄取食物和排泄残渣。在运动时，身体经常变化，无一定的体形，典

型代表如变形虫。

4. 吸管虫纲 (Suctorida)

这一类原生动物仅在发育早期有纤毛，成年状态没有任何运动器官，大多数附着在物体上生活。本纲最重要的特点是有特殊的吸管，以此来捕食纤毛虫类等。

5. 孢子虫纲 (Sporozoa)

本纲原生动物没有运动小器官。孢子虫类能形成小的孢子。本纲都是寄生性的，多数带有病原性，如疟原虫。

原生动物和后生动物一起构成浮游动物，有的可以使水产生不良气味；有的则对污水净化起一定的作用。在废水生物处理中，不同阶段，不同季节和不同条件下，这些原生动物出现的种类、数量等是不相同的。近年来都在尝试通过观察掌握这些规律，以期推测处理效果的变化。

废水处理中常见微型动物检索表和图见附录三、附录五。

(二) 原生动物的一般特征

在废水处理中的微型动物，只有原生动物是单细胞动物，其他轮虫、寡毛类等都是多细胞的动物。在生理功能上，单细胞原生动物是一个完全独立的有机体，能够和多细胞一样，行使营养、呼吸、消化、排泄、行动、生殖等各种机能。在细胞体内有相应分工的细胞器。下边分别加以说明。

1. 细胞质和细胞核

除了细胞核以外，都是细胞质，它是由胶体形成，所以具有改变粘度的能力。原生动物的细胞核，在肉足类、鞭毛类中一般是一个核。纤毛虫及吸管虫通常有一个大核和一个小核，前者具有营养活动功能，后者具有生殖活动之功能。

2. 行动胞器

(1) 伪足：伪足是原生动物最简单的一种行动工具，它是由原生质表面突出形成的，能向前推进，如要改变方向，原有的伪足立即消失，又从另一个方向伸出伪足。伪足除行动外，还有抓食之用。伪足的形状有叶足，如变形虫；丝足，如鳞壳虫；轴

足，如刺胞虫。

(2) 鞭毛：鞭毛是长的、线状的细胞质突起，是从体内基粒伸出，有的直接从核上伸出。鞭毛有1~8根，有游泳鞭毛和舵鞭毛之分。

(3) 纤毛：它的构造与鞭毛相似，也是细胞质的线状突起。纤毛比鞭毛多得多，有的可达上百、上千根，而且长短也不尽相等。纤毛可以披满全身，也可以退化为身体的一部分有纤毛，从纤毛演变而来的还有触毛，波动膜及小膜。触毛可以朝不同方向弯曲，波动膜可以将食物赶入细胞中。

3. 支持、保护胞器

有的原生动物体外有较硬的骨骼似的构造，起支持和保护作用，如板壳虫、鳞壳虫、表壳虫等。在体内有丝泡、刺杆，也是起支持和保卫作用的。

4. 消化、营养胞器

废水处理中原生动物的营养方式大致有以下几种：(1) 植物式营养，主要是在植物性鞭毛虫中。(2) 腐生性营养，以死的、腐烂的物质为生，如无色鞭毛虫。(3) 动物式营养，以摄取颗粒食物为主，经过消化、吸收、排泄等代谢过程，如动物性鞭毛虫、肉足虫、纤毛虫多属此种营养方式。在纤毛虫中，有胞口、胞咽、口前庭等，通过口围上的纤毛活动，将食物引入胞口，在胞咽处形成食物泡，进而在体内循环进行消化和吸收。

5. 排泄胞器

原生动物需要排出体内多余的水分及积累在原生质内新陈代谢产物。某些动物性鞭毛虫没有专门的排泄器，是依靠体表面的渗透作用来完成的。大多数种类有专门的排泄器——伸缩泡。它不同于食物泡，是一种发亮的液泡，把废物排泄出去后就收缩。食物泡可以有数个，而伸缩泡只有一个到二个。伸缩泡有小孔直通体外。小口钟虫的伸缩泡大约15秒钟收缩一次。有人认为伸缩泡还有呼吸及调节渗透压的作用。

6. 感觉胞器

原生动物的行动器官，如伪足、鞭毛、纤毛等也有感觉作用。另外还有专门的感觉器。如植物性鞭毛虫的眼点，一般呈褐色，位于体前端。有些纤毛虫的部分纤毛变为感觉器官刚毛。

7. 生殖及胞囊的形成

原生动物的生殖可分为有性生殖和无性生殖两种。无性生殖是简单的细胞分裂。在环境条件适宜的情况下，原生动物连续不断地进行无性繁殖，污水处理中常常看到某种原生动物在2~3天内突然猛增，成为绝对的优势种类，就是无性繁殖非常强盛之故。有性生殖严格地说，并不是专门的繁殖方式。这种生殖常常出现于环境条件较差或连续无性生殖时间较长，种群比较衰老，需要交替有性生殖以增加其生活力。

变形虫无性生殖细胞分裂没有严格的方向，鞭毛虫及纤毛虫则有严格的细胞分裂方向。鞭毛虫是纵分裂，纤毛虫是横分裂。但也有例外，如缘毛虫类是纵分裂，钟虫即是一例（图2-2-1）。经纵分裂的另一个体后面长出一圈纤毛（图2-2-2），在水中游泳，称为游泳体，然后固着在底物上，长出柄来，有时固着形钟虫也在个体生活史中一定时期出现游泳体。先在钟虫后端出现一圈纤毛，口缘也缩进去，身体加长，成圆柱状（图2-2-2）。接



图 2-2-1 钟虫的细胞分裂



图 2-2-2 缘毛目形成游泳体的过程

着离开了柄，进行游泳。此游泳体遇到合适地方用纤毛圈一端固着于底物，纤毛退化，长出柄来，又恢复了原来钟虫的样子。

吸管虫的无性生殖，是出芽生殖，子体离开母体后成为游泳体，形似鞋底状，全身披纤毛，然后逐渐退化，长出吸管和柄，固着底物上生活。整个过程历时半小时。

原生动物的有性生殖，是两个相当于雌雄细胞或性配子以融合或接合方式完成。前者是配子结合，各类原生动物均有此种生殖方式。后者是接合生殖，只有纤毛虫及吸管虫才有此生殖方式。

配子结合后的个体称为合子，当遇到不良环境时个体外有胞膜包围形成孢囊，以渡过不良环境，当环境好转时，胞膜退化，进行正常生活和无性生殖。

纤毛虫进行接合生殖，其中草履虫是两个接合体大小相似。缘毛虫类如小口钟虫的接合体有大小之分。它们进行不等分裂，形成一个有柄的大接合体及一个自由生活的小接合体(图2-2-3)。小接合体在水中游泳，接触到大接合体的底部进行接合生殖，小接合体的原生质全部进入大接合体中去(图2-2-3)。

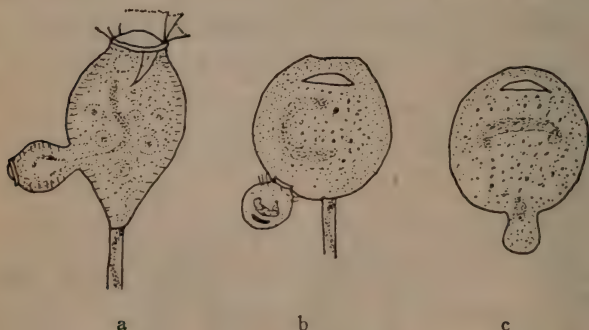


图 2-2-3 小口钟虫的接合生殖(有性生殖)过程

a—接合前营养体进行不等分裂，分为一个固着于柄上的大接合体及一个自由游泳的小接合体；b—小接合体在水中自由游泳一段时间后，固着于大接合体后部；c—大小接合体进行接合生殖

二、轮虫及其他微型动物的特征

本节主要介绍以下几种微型动物的一般形态特征。

(一) 轮虫

轮虫(图2-2-4)是一种多细胞动物,属原腔动物门(Aschelminthes)的轮虫纲。形体很小,只有在显微镜下可以观察清楚。因在头部前面有一个具有纤毛的头冠,在蛭态目中头冠形似两个车轮,故称轮虫。

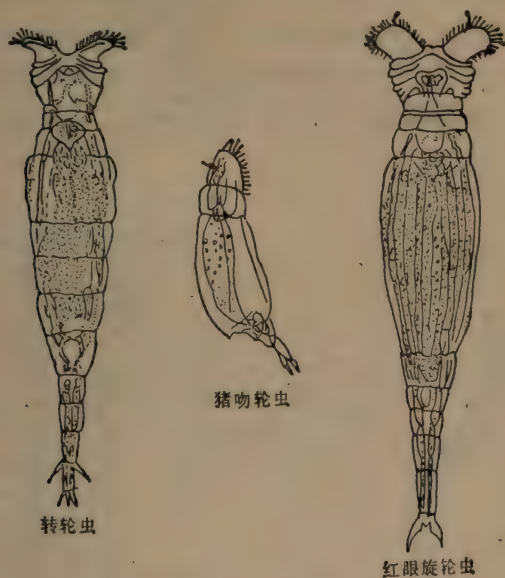


图 2-2-4 轮虫

(1) 外部形态: 体形各种各样, 以纵长较多, 一般可分为头、颈、躯干和尾(足)几个部分。

(2) 内部构造: 轮虫内部构造也比较复杂, 不同的器管、系统执行不同的生理机能。已有消化系统、排泄系统、神经系统和生殖系统之分。

(3) 生殖: 轮虫有两种生殖方式。

单性生殖(或孤雌生殖), 它是轮虫的主要生殖方式。也就是不混交的雌体产生的卵不需要受精即可发育成为新的不混交雌体。

有性生殖，此种方式少见，主要是在环境不良时出现混交雌体，它产生的卵经受精以后，在遇到适宜的条件时，则发育成为新的不混交雌体，再进行单性生殖。若不受精，则发育成雄体，它的生命很短，不易见到。

（二）线虫

线虫（图2-2-5）属原腔动物门的线虫纲。具有细长线形的身体，横切呈圆形。内部构造也有分化，雌雄异体。线虫不能自由伸缩，而是靠身体作蛇形的扭曲来运动。有草食性和肉食性之分。以碎屑、单细胞藻类和真菌、其他线虫、轮虫等为食物。幼虫还有脱皮的特征。



图 2-2-5 线虫

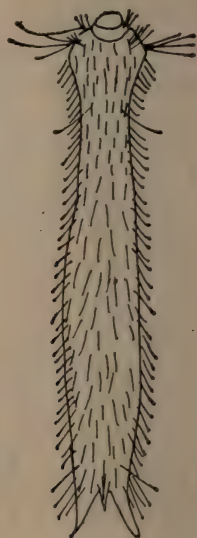


图 2-2-6 腹毛虫

（三）腹毛虫

腹毛虫（图2-2-6）也属原腔动物门，腹毛虫纲，是蠕虫状动物，身体腹面有许多密集的纤毛，以此活动于碎屑中觅食。

（四）水栖寡毛类

此即水蚯蚓，属环节动物门（Annelida），毛足纲，寡毛

目，比陆栖种类小，蠕虫状，出芽生殖，高级种类进行有性生殖，雌雄同体。这一类的代表种如图2-2-7所示。

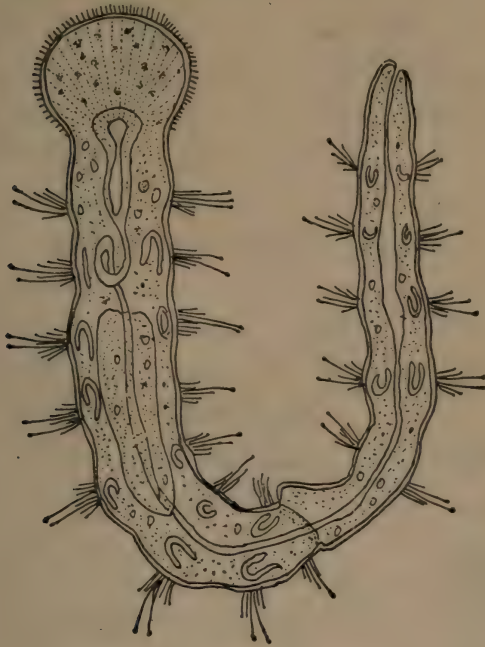


图 2-2-7 红斑瓢体虫

（五）节肢动物

在废水处理中，偶然还出现少量的水熊（Tardigrada）、枝角类（Cladocera）（通称水蚤、俗称红虫）、挠足类（Copepoda）（甲壳动物）、水黾（Hydracarina）和摇蚊科（Chironomidae）的幼虫等，这些微型动物对废水处理意义不大。它们共同特点是身体分节、各节之间有关节，故能作相当复杂的运动。上述几种节肢动物如图2-2-8所示。

三、废水处理中微型动物生态特点

废水生物处理的构筑物对微型动物是个特殊的生态系统，各种因子都会直接或间接地影响到微型动物的生长发育、种类组成

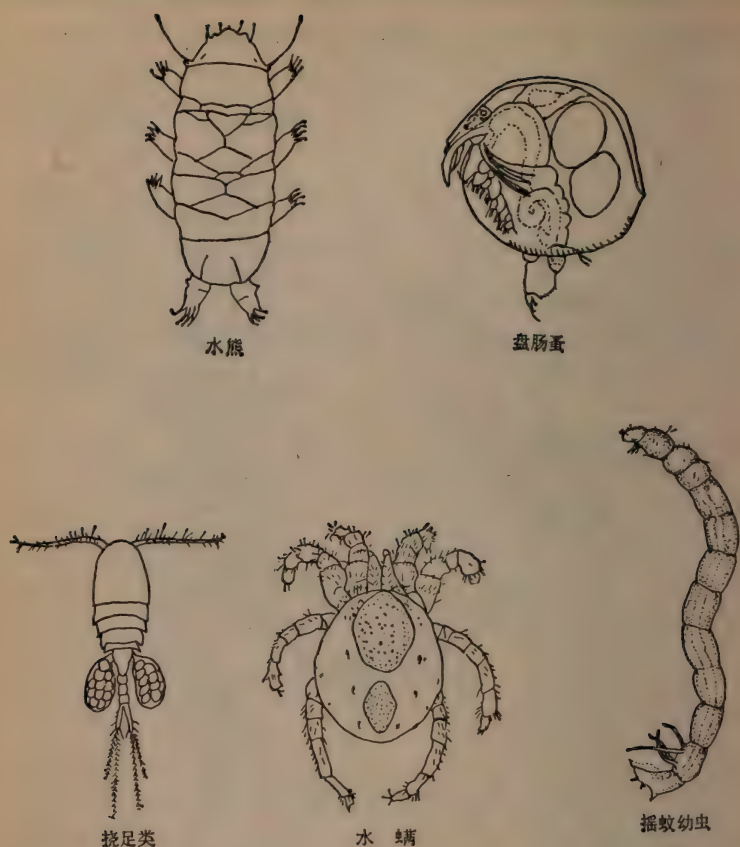


图 2-2-8 节肢动物图示

及数量变化。因此研究和了解废水处理过程中各类微型动物、特别是占优势的原生动物和轮虫等的生态特征，才能配合理化分析对生产运转情况作出正确的判断，以利加强管理工作，及时处理意外情况。

(一) 种类变化

1. 种类组成特点

废水好气生物处理法，如活性污泥法、散水滤床法和氧化塘

法等装置内，都有相当数量的原生动物。在正常活性污泥中原生动物约为5,000~20,000个/毫升。各类因子对微型动物的区系组成是错综复杂的。人们从长期积累的资料中逐渐发现在普遍的种类中有共同的种类，有终年可见种类，这些种类常称之为重要种类，固有种类或常见种类。简言之，是经常遇见的，数量上也往往占优势或比较多的。据湖北省水生生物研究所有关资料，综合分析我国活性污泥中最常见的纤毛虫类是小口钟虫、沟钟虫、八钟虫、领钟虫、瓶累枝虫、褶累枝虫、集盖虫、微盘盖虫、采盖虫、螳状独缩虫、有肋楯纤虫、盘状游仆虫；肉足类中有蛞蝓变形虫、点滴变形虫、小螺足虫；鞭毛虫中有尾波豆形虫、梨波豆形虫、粗袋鞭虫；轮虫中有转轮虫、红眼轮虫。也就是说，有钟虫类、盖虫类、累枝虫类、独缩虫类、变形虫类、鞭毛虫类，轮虫及其他一些纤毛类是经常遇到的种类。

结合国外的资料来看，有几个种类更带有共同性和普遍性。这些种类是：有肋楯纤虫、小口钟虫、沟钟虫、白钟虫、领钟虫、采盖虫、褶累枝虫、螳状独缩虫等。

由上述情况可以看出，在常见种类中的原生动物最占优势，其次是轮虫，而原生动物中又以纤毛虫为优势。纤毛虫中最占优势的是缘毛目，其中又以有柄纤毛虫的钟虫类占优势。日本的井出哲夫（1978年）编著的《水处理工学》一书列举的活性污泥中出现的纤毛虫类与水质关系如表2-2-1。

在散水滤床内由于保持着良好的好气条件，适于好气性微生物的生长繁殖，微生物量约为5~7公斤/米³左右。滤床上的生物相有各种细菌，菌类和藻类，也有相当数量的原生动物。主要有独缩虫属（*Carchesium*）、累枝虫属（*Epistylis*）和轮虫等后生动物。

在氧化塘内，藻类进行光合作用，为微生物提供了氧气。主要优势原生动物种类是衣滴虫属（*Chlamydomonas*）、眼虫属（*Euglena*）和扁眼虫属（*phacus*）等植鞭毛虫类。

此外，须藤等（1976年）在应用生物转盘处理家庭生活污水

表 2-2-1 活性污泥中出现的纤毛虫类和水质等级分类表**

种 类	处 理 水 的 BOD			
	0~10	11~20	21~30	>30
<u>亚纲1.全毛亚纲 (Holotrichia)</u>				
毛板壳虫* (<i>Coleps hirtus</i>)	10	0	0	0
卑怯管叶虫 (<i>Trachelophyllum pusillum</i>)	3	3	3	1
克氏裂口虫* (<i>Amphilepter claparedi</i>)	10	0	0	0
<i>Litonotus anguilla</i> (一种漫游虫)	10	0	0	0
纺锤半眉虫* (<i>Hemiophrys fusidens</i>)	3	4	3	0
片状漫游虫 (<i>L. Carinatus</i>)	10	0	0	0
龙骨漫游虫 (<i>L. fasciola</i>)	0	10	0	0
肋状半眉虫 (<i>H. pleurosigma</i>)	10	0	0	0
刀刀口虫 (<i>Spathidium Spathula</i>)	5	5	0	0
小轮毛虫 (<i>Trochilia minuta</i>)	0	10	0	0
僧帽斜管虫 (<i>Chilodonella Cuccullulus</i>)	4	4	1	1
钩刺斜管虫 (<i>C. uncinata</i>)	3	6	1	0
旋转单瓣虫 (<i>Drepanomonas revoluta</i>)	1	4	5	0
暗尾丝虫 (<i>Uronema nigricans</i>)	2	4	4	0
梨形四膜虫 (<i>Tetrahymena Pyriformis</i>)	1	3	3	3
<i>Sathrophilus Oviformis</i> *	10	0	0	0
闪瞬目虫 (<i>Glaucoma Scintillans</i>)	2	2	3	3
弯豆形虫 (<i>Colpidium Campylum</i>)	2	2	2	4
肾豆形虫 (<i>C. Colpoda</i>)	0	0	4	6
双核草履虫 (<i>paramecium aurelia</i>)	10	0	0	0
尾草履虫 (<i>P. Caudatum</i>)	2	5	3	0
<i>Paramecium trichium</i> (一种草履虫)	4	3	2	1
珍珠映毛虫 (<i>Cinetochilum margaritaceum</i>)	7	3	0	0
<u>亚纲 2. 缘毛亚纲 (Peritrichia)</u>				
领钟虫 (<i>Vorticella aequilata</i>)	2	2	3	3
白钟虫 (<i>V. alba</i>)	3	3	3	1
钟形钟虫 (<i>V. Campanula</i>)	8	2	0	0
<i>V. Communis</i> * (一种钟虫)	10	0	0	0
沟钟虫 (<i>V. Convallaria</i>)	3	4	2	1
长钟虫 (<i>V. elongata</i>)	10	0	0	0
法帽钟虫 (<i>V. fromenteli</i>)	5	4	1	0
弯钟虫 (<i>V. hamata</i>)	7	2	1	0
小口钟虫 (<i>V. microstoma</i>)	2	4	2	2

续表 2-2-1

种	类	处 理 水 的 BOD			
		0~10	11~20	21~30	>30
星云钟虫 (变种为似钟虫)					
(<i>V. nebulifera</i> Var. <i>similis</i>)		5	5	0	0
条纹钟虫 (变种为八钟虫)					
(<i>V. striata</i> Var. <i>octava</i>)		3	3	2	2
<i>Zoothamnium mucedo</i> (一种聚缩虫)		10	0	0	0
<i>Z. Pygmaeum</i> (一种聚缩虫)		10	0	0	0
螳状独缩虫 (<i>Carchesium pdypinum</i>)		3	5	2	0
褶果枝虫 (<i>Epistylis plicatilis</i>)		0	4	4	2
浮游果枝虫 (<i>E. rotans</i>)		10	0	0	0
集盖虫 (<i>Opercularia Coarctata</i>)		2	2	4	2
彩盖虫 (<i>O. phryganeae</i>)		0	0	0	10
<i>Telotrichidium henneguyi</i> *		0	0	0	10
<u>亚纲 3. 旋唇亚纲 (<i>Spirotrichia</i>)</u>					
<i>Stentor roeseli</i> (一种喇叭虫)		10	0	0	0
柱旋口虫* (<i>Spirostomun teres</i>)		0	10	0	0
有肋楯纤虫 (<i>Aspidisca costata</i>)		3	3	2	2
锐利楯纤虫 (<i>A. Lynceus</i>)		5	5	0	0
<i>A. turrita</i> (一种楯纤虫)		10	0	0	0
似后毛虫 (<i>Opisthotricha Similis</i>)		5	5	0	0
膜状急纤虫 (<i>Tachysoma pellionella</i>)		0	10	0	0
锥状下毛纤虫* (<i>Hypotrichidium Conicum</i>)		0	0	10	0
似织毛虫 (<i>Histiculus Similis</i>)		10	0	0	0
亲游仆虫 (<i>Euplotes affinis</i>)		6	4	0	0
龙骨游仆虫 (<i>E. Carinatus</i>)		2	4	4	0
阔口游仆虫 (<i>E. eurystomus</i>)		2	4	0	0
多污游仆虫 (<i>E. moebiusi</i>)		3	3	3	1
盘状游仆虫 (<i>E. patella</i>)		4	3	3	0
<u>亚纲 4. 吸管亚纲 (<i>Suctoria</i>)</u>					
<i>Acineta Cuspidata</i> * (一种壳吸管虫)		10	0	0	0
<i>A. grandis</i> (一种壳吸管虫)		10	0	0	0
粗壮壳吸管虫 (<i>A. foetida</i>)		0	0	10	0
固着足吸管虫 (<i>podophrya fixa</i>)		0	2	7	1
胶衣足吸管虫 (<i>p. maupasi</i>)		0	10	0	0
<i>podophrya Carchesii</i> (一种足吸管虫)		2	2	3	3
软锤吸管虫 (<i>Tokophrya mollis</i>)		0	5	5	0
四分锤吸管虫 (<i>T. quadripar tita</i>)		4	3	3	0

续表 2-2-1

种 类	处 理 水 的 BOD			
	0~10	11~20	21~30	>30
<i>Discophrya elongata</i>	0	10	0	0
大球管虫 (<i>Sphaerophrya magna</i>)	0	2	7	1
Flagellated protozoa (鞭毛原生动物)	0	0	4	6
Ciliated protozoa absent (无纤毛的原生动物)	0	0	0	10

* 观察次数较少、观察时应注意。

** Curds C.R. et al (1970), Water Research 4 (3): 225~236.

时,发现除有各种细菌外,原生动物中还有累枝虫属、钟虫属 (*Vorticella*) 和盖虫属 (*Opercularia*) 等大量出现。

2. 种类出现的顺序性

在活性污泥培养与驯化过程中,微型动物出现的种类常常有一定规律的顺序性。最初出现的是小的鞭毛虫和根足虫,如粗袋鞭毛虫、聚屋滴虫、变形虫。这是因为有些鞭毛虫及变形虫种类能够直接吃有机物质颗粒。以后细菌繁殖增强,细菌代谢能力比鞭毛虫、肉足虫强得多,鞭毛虫和肉足虫因竞争不过细菌而逐渐减少了。同时开始出现了一些吃细菌的纤毛虫。在细菌大量繁殖并开始形成絮状物以后,则以自由生活的纤毛虫占优势,并有爬行的下毛目种类出现。随着絮状物的增多,生物处理的效果逐渐发展,就开始出现有柄的纤毛虫种类。纤毛虫出现的顺序大体是全毛目→异毛目→下毛目→缘毛目。在有柄纤毛虫出现之前,轮虫也开始出现(图2-2-9)。以上这些规律性主要是受食物因子约束的,它反映了一个食物链的过程。

因此,从微生物生态的观点看,活性污泥法是有有机污染物、细菌、原生动物的食物链的生物反应(图2-2-10)。

总之,在正常运转时,微型动物种类比较单纯,以有柄纤毛虫占优势。在完全正常运转过程中,如果大量出现鞭毛虫、根足虫和游泳型纤毛虫类(如草履虫、尾丝纤毛虫),多半表示生产

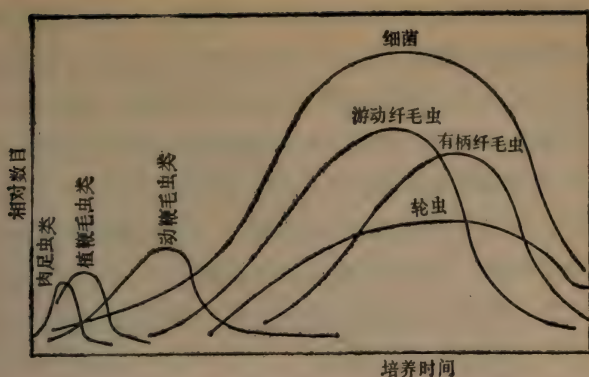


图 2-2-9 活性污泥培养阶段各类微生物演替图示^[35]

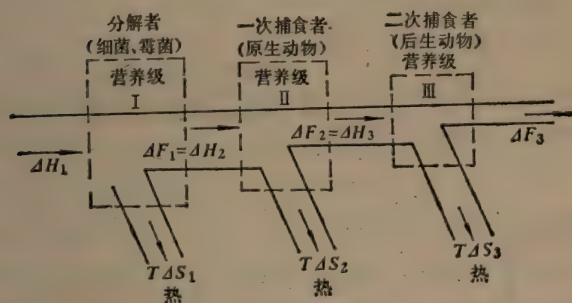


图 2-2-10 活性污泥微生物的食物链和能量迁移

$$\Delta H = \Delta F + T\Delta S$$

ΔH —焓的变化； ΔS —熵的变化； ΔF —自由能的变化； T —温度

不正常，处理过程发生了问题，处理效果下降。

(二) 数量变化

在废水生物处理中的微型动物，从数量来说，95%以上是原生动物，其次是轮虫，其他如线虫、寡毛类是很少见的。在自然界轮虫数量高峰出现在夏秋两季，纤毛虫有春、秋二个数量高峰的规律。在生物处理装置内，微型动物种群数量变化不同，特别是小型鞭毛虫、根足虫往往在3~4天内就会上升或下降几十倍，很难反映出季节变化。它们的高峰往往配合着一些常见种类的高

峰。根据湖北省水生生物研究所(1978年)的调查资料(表2-2-2),发现不同类型废水活性污泥的微型动物有以下特点:(1)从不同水质来看,生活污水数量最高,印染污水次之,石油、化工、农药等更少。有时甚至看不到原生动物,但仍发生毒物分解,显然是细菌在起作用;(2)肉足类主要是小型变形虫的适应能力强,对毒物的抵抗力也最强;(3)塔式生物滤池和生物转盘上的生物膜,在废水进口处的滤料上,原生动物的种类和数量均少一些,随着污水的流动和处理,这些微型动物也就多起来。

表 2-2-2 各种类型废水处理活性污泥中微型动物数量比较

(单位:个/毫升)

废 水 类 型		鞭 毛 虫	肉 足 虫	纤 毛 虫 (有柄纤毛虫)	轮 虫	微型动物总数
含 酚 废 水	炼油厂	0~225	0~540	450~4635 (360~4635)	0~90	0~4680
	焦化厂	0	0~16200	0~90 (0)	0	0~16290
	煤气厂	0	63315	3690 (3285)	0	67005
	木材防腐厂	0~127	28~6305	10~7986 (0~7351)	15~360	405~9241
石油化工废水		0~875	0~4860	540~30960 (270~25020)	45~4500	630~41940
印染废水		0~7830	0~36810	125~66330 (125~17820)	0~945	5310~66825
农药废水		0	16200	90 (0)	0	16290
生活污水		0~87120	45~5760	2800~17685 (2080~12150)	0~720	12835~ 105750

影响这些微型动物数量变化的因素很多，但从各种技术参数分析结果来看， BOD_5 负荷量是决定原生动物种类数量变化的重要因子。虽然原生动物对 BOD_5 负荷的适应范围很宽，可以高达数千毫克 BOD_5 /升·日，但大量出现却只是一个很狭的范围内，此称为最适度。一般讲，在最适度范围内增加负荷，表示养料增加，可以促进细菌的增长，而细菌又是大多数原生动物的食料，所以引起了原生动物的增加。

(三)生物相的观察

生物与环境是一个统一体，当环境条件改变时，就必然会在生物相上反映出来，因此生物相的变化和生产实践有着密切的关系。在污水生物处理中，对生物相的观察要着重抓住以下几方面：

1. 生物活动的状态

以钟虫为例，在观察印染污水处理生物相时，可以观察其纤毛摆动的快慢，体内是否积累有较多的食物泡，伸缩泡的大小及收缩情况，繁殖情况等等。

(1) 对溶解氧的反应：污泥中的生物对溶解氧的适应有一个极限范围，如钟虫在 1~3 毫克/升时，可以正常生长繁殖，当溶解氧低时，则大量死亡，栉纤虫逐渐减少，等枝虫残存一部分。

同时溶解氧过高或过低时，还可以看到钟虫头端突出一个空泡，即俗称“头顶气泡”，这时应及时检查原因，若溶解氧过低则应调整转速，以增加充氧能力，若溶解氧过高则应检查是否有积泥现象。

(2) 废水成分（特别高浓度抑制物质）的影响：当废水中有高浓度的某种抑制物质（温度过低产生同样现象），则钟虫内积累有未消化颗粒，呈不活跃状态（即体内积累有过多的未消化的食物泡），长期下去则引起中毒，虫体死亡，甚至等枝虫的虫体自柄上落下。

有的研究指出，当活性污泥内铁含量在 16 毫克/升时对钟虫增

殖略有影响,32毫克/升时可导致死亡,而盖虫和豆形虫对铁的抵抗力要比钟虫强。钟虫和盖虫对铝都表现得很敏感,对铜的忍耐力也不高,在铜为0.8毫克/升时就不能生存。对铬来说,钟虫在1.8毫克/升以上就不能增殖,而豆形虫和盖虫分别在12.8和25.6毫克/升时还能增殖。

(3) pH值的影响:如果pH突然超过正常范围,使曝气池pH升至8,可立即看到钟虫呈不活跃状态,纤毛环停止摆动;轮虫缩入甲被内。这时污泥结构松散,出水效果较差。

(4) 环境条件变化对纤毛虫生殖方式的影响:在正常运转条件下,纤毛虫类是用无性生殖来进行分裂的,分裂速度也是比较快的。如游泳钟虫的增多,轮虫未受精卵出现多时,仍可认为污泥是正常的。当环境不适合时,例如遇到有毒物质,或食物来源不足,或温度过高过低,溶解氧过少,pH过高等,就会进行有性生殖——接合生殖,最后形成孢囊以渡过不良环境。这时虫体变圆,鞭毛、纤毛或伪足等运动器管也缩入体内或消失,然后从体内分泌一种胶状物质至身体表面,凝固成胞壳。孢囊(孢子)是原生动物适应不良环境的一种方式,一旦遇到适宜环境,又从孢囊脱壳而出。

因此,如果遇到原生动物种类出现不健康现象,如纤毛虫活动力差,缘毛目纤毛虫的口盘缩进,伸缩泡很大,细胞质空泡化,行动迟缓,有接合生殖,形成大量孢囊等生物不活跃情况,即使数目再多,也可能反映出生物处理的正常现象受到干扰或破坏。

2. 同一种生物数量增减的情况:

钟虫,在处理印染污水时,污泥培养阶段,出现钟虫即标志污泥已经形成,出水已见效果。从它们数量的增减情况,也可以间接推测处理效果。当污泥膨胀时,丝状菌剧增,钟虫逐渐减少,而当膨胀控制之后,则钟虫数量亦上升。

前面已经说过,轮虫属于后生动物,它生活在较清洁的水中,所以在培养后期出现,它的出现也标志着处理效果良好。当

污泥老化，结构松散，则轮虫产生恶性繁殖，数量急剧上升。楯纤虫，在高碳低氮条件下，生长良好，数量极多。

以上是根据有关资料，提出的一些初步现象，供作参考。当然对不同条件来说，各类生物的反应是不同的，而且生物相的变化常常是几种环境相互作用的结果，这些都有待进一步通过实践摸索，不断地总结出规律性的东西来，以指导污水生物处理的管理工作。

四、微型生物的作用与指示生物的应用

已经知道在污水生物处理中，有机物质矿质化主要是细菌的作用，在活性污泥中游离细菌和成絮菌均有分解能力。而且后者还兼有强烈吸附大量悬浮物的能力。微型动物，特别是原生动物，它们在废水处理中有些什么作用呢？从现有资料来看，大体有以下几方面的作用。

（一）微型动物在废水净化中的作用

1. 直接利用废水中的有机物质

某些小型的动物性鞭毛虫，变形虫和一些小的纤毛虫，可以直接利用废水中的有机物质；小口钟虫、梨形四膜虫等既能食细菌，又能直接提高BOD₅的去除率。

2. 在絮凝过程中的作用

絮凝是活性污泥形成过程中的一个重要现象。它关系到氧化有机物质的能力和污泥的沉淀性能，因而直接影响到处理效果和出水水质。絮凝是细菌生长到一定阶段后就凝集起来，先小后大，形成花絮一样的絮状物。在絮状物的周围着生和爬行许多微型动物。如果絮状物上着生的纤毛虫多，则出水就很清。细菌本身对凝集起着重要作用，关于成絮菌的分离和絮凝形成机理作了许多研究。但如果出现纤毛虫和轮虫，这种凝絮过程就可能加速。有关应用示踪原子法研究纤毛虫促成絮凝作用的机制指出，纤毛虫能分泌两种物质，一种为多糖碳水化合物，另一种是单糖结构的葡萄糖和阿拉伯糖，污水中的悬浮颗粒吸收这些物质，通过改变悬浮颗粒表面电荷，使其集结起来，形成絮状物。另外，

纤毛虫还能分泌一种粘朊，能把絮状物再联结起来。所以有的认为纤毛虫比细菌更多地担负着絮凝作用。

3. 对细菌的吞食能力

根据Curds(1968年)实验，纤毛虫对细菌的掠食能力是惊人的，例如当活性污泥中没有纤毛虫时，出水非常混浊，出水中细菌数量平均100~160百万个/毫升，当接种了纤毛虫以后，出水非常清澈，出水中游离细菌数立即下降到1~8百万个/毫升。又如奇观独缩虫(*Carchesium Spectabile*)在自然水体中一小时能吃三万个细菌。可见纤毛虫类对水的澄清起了明显的作用。而且对出水水质的其他指标也有了改善。所以认为纤毛虫除了澄清作用外，还有一定的净化作用(表2-2-3)。1967~1969年，日本的桥本、须藤等用许多种细菌研究了小口钟虫的食性，证明钟虫是以捕食细菌维持正常增殖的。

表 2-2-3 纤毛虫在废水净化中的作用*

项 目	未加纤毛虫	加入纤毛虫
出水平均BOD ₅ (毫克/升)	54~70	7~24
过滤后BOD ₅ (毫克/升)	30~35	3~9
平均有机氮 (毫克/升)	31~50	14~25
悬浮固体值 (SS) (毫克/升)	50~73	17~58
沉降半小时后的悬浮固体值 (毫克/升)	37~56	10~36
600毫微米时的光密度	0.340~0.517	0.051~0.219

* Curds, C.R., et al., Water Pollut. Control, 67:312, 1968.

(二) 指示生物及其应用

所谓指示生物就是指适合某一环境生长的生物，它体现了生物与特定环境的统一性。指示生物大致包括自然指示生物，活性污泥指示生物和残毒物质指示生物，三者的概念是不同的，应用时不可混淆。这里主要谈活性污泥中的指示生物的应用问题。指示生物的作用有以下几方面：

1. 指示处理效果

一般说来，固着生长的纤毛虫多时，指示处理效果良好，出水BOD₅和混浊度低。这些种类是小口钟虫、八钟虫、领钟虫、沟钟虫、褶累枝虫、瓶累枝虫、微盘盖虫、独缩虫等。这些缘毛目的种类都固着在絮状物上，其中还夹杂一些爬行的楯纤虫、游仆虫、尖毛虫等，这说明优质的活性污泥已经成熟。与此同时也往往出现有少量的红眼旋轮虫和转轮虫。其中小口钟虫无论在生活污水或工业污水处理中，当处理效果很好时，它常常也就是优势种。

如果出现大量的纤毛虫，着生的缘毛目很少时，说明净化作用不太好。

大量的自由游泳的纤毛虫成为优势种类时，同样指示净化作用不好，混浊度上升。特别是当这些自由游泳的全毛目纤毛虫突然增加，表明水质处理效果将要下降。我们在印染废水生化处理试验中也看到这种情况。

在日本，常以钟虫为中心来推断废水处理状况。通常建议以下列七项作为主要指标：

- (1) 全原生动物个数/毫升
- (2) 有柄纤毛虫个数/毫升
- (3) 钟虫个数/毫升
- (4) 有柄纤毛虫个数/全原生动物个数 (%)
- (5) 有柄纤毛虫个数/全纤毛虫个数 (%)
- (6) 钟虫个数/全原生动物个数 (%)
- (7) 钟虫个数/全纤毛虫个数 (%)

这些指标对指导生产运转和管理都是比较奏效的，有一定的参考价值。

日本盛下(1971年)用粪便处理的活性污泥移入人工废水中进行驯化，在驯化的17天中，求出有关原生动物的三项指标如表2-2-4所示。可以看出，钟虫的个数/毫升在驯化过程中迅速上升，而后半期稳定下来。有柄纤毛虫个数/全纤毛虫个数 (%) 在驯化过程中明显降低，驯化后期又明显恢复，而有柄纤毛虫个

数/全原生动物个数(%)降低以后不能再恢复原状,这可能是纤毛类以外的原生动物增加了,这表明活性污泥培养驯化效果不良。这一点和他同一时期测定的理化指标和处理效果是一致的。

表 2-2-4 活性污泥驯化时有关原生动物指标的变迁

指 标 \ 驯 化 日 数	0	1	2	3	4	5	7	8
有柄纤毛虫个数/全原生动物个数(%)	100	100	100	96.1	93.4	90.8	76.5	55.8
钟虫个数/毫升	20	100	340	1640	3060	4080	6995	8240
有柄纤毛虫个数/全纤毛虫个数(%)	100	100	100	98.9	94.5	92.1	77.7	57.1
指 标 \ 驯 化 日 数	9	10	12	14	15	16	17	
有柄纤毛虫个数/全原生动物个数(%)	61.4	58.0	61.0	69.7	71.0	67.2	68.8	
钟虫个数/毫升	8020	15320	12740	12320	12600	11040	10660	
有柄纤毛虫个数/全纤毛虫个数(%)	62.3	60.2	70.6	83.7	88.1	96.1	98.0	

2. 指示污泥性质

有的认为轮虫过多,则是污泥将要膨胀的预兆;有的认为根足虫的大量出现往往是污泥中毒的表现。即使同一种生物也能起不同的指示作用。如在生活污水处理中,累枝虫的大量出现是活性污泥膨胀、变坏的征兆;而在印染污水中,则累枝虫却可作为活性污泥正常或改善的指示生物。

3. 对细菌生长阶段的指示

有人认为钟虫可作为活性污泥性质的指示剂。小口钟虫是吃细菌的,常在细菌生长活跃、活力最盛的对数期出现。沟钟虫需要细菌的代谢副产物,常出现在衰老期,领钟虫则出现在二者之

间。除了它们的数量，还要注意钟虫本身的活力——即生物相，也就是生物活动状态。处在对数期的细菌中加入八钟虫后，纤毛虫生长很健康，而在衰老期的细菌中加入八钟虫后 1 小时就产生接合生殖。因此理论上推论，如果细菌的活力旺盛，则八钟虫、小口钟虫很多，生物相也很活跃。如果沟钟虫数量大，而且生物相也不健康，就反映出细菌活力在衰退，BOD₅ 去除率也差。当然这仅是理论上的推断，尚需实践来验证。

应当指出，在某些工业废水（如炼油、农药等）的活性污泥中原生动物极少，但处理效果很好，此时有特定的细菌在生长，因此在这种情况下，常常需要根据菌胶团的数量和大小来作为判断处理效果的指标。

综上所述，可以得出一个粗浅的印象，就是在活性污泥的培养与驯化过程中，如果出现了良好的絮凝作用，有柄纤毛虫（即固着型）数量占优势或相当多时，可转入正常运转，可以取得较好的处理效果。

五、藻类植物与废水处理

藻类植物是一大类构造简单、没有根、茎、叶分化的低等植物，广泛分布于土壤、江河、湖泊和海洋中。藻类大小也不同，淡水藻个体很小，须用显微镜才能看见；盐水藻类如海带可长达数尺。藻类在水中常浮游在水面或附着在水草或水底固体物表面，进行营养繁殖、无性繁殖和有性繁殖。

藻类由于含有色素，能够利用太阳能进行光合作用，消耗 CO₂，放出氧气。

藻类有好几个门，其中与给排水工程、环境保护方面关系比较密切的是蓝藻门、绿藻门和硅藻门。近年来，有不少资料说明了藻类在污水净化方面有一定的作用。例如应用藻类除汞、印染污水的处理等都有一定的效果。也有报导指出藻类在生物监测方面的一些应用。

另外，如第一篇中所说，当河流、湖海受到氮、磷、钾等的污染以后，常常引起藻类大量繁殖，形成所谓“赤潮”，影响水

质，损害渔业生产。

(一) 藻类植物的基本特征

1. 蓝藻门

蓝藻是单细胞或多细胞群集在一起或成丝状，形成很大的群体，肉眼容易看见。细胞内含叶绿素和藻蓝素等，能使水具有蓝绿色。蓝藻盛行于晚夏，当地面水源较暖时，大量繁殖，在水面形成“水华”，有的能使水产生草腥或霉的气味，当大量死亡时，使水具猪圈气味。

本门常有以下种类。

(1) 铜色微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*): 生长于池塘、湖泊中，细胞很小，球形，许多聚集在一起，共同生活于一个胶被中，形成大胶团，游于水中，夏秋大量繁殖。

(2) 大颤藻 (*Oscillatoria princeps*): 生活在污水或潮湿土地上。个体为多细胞圆柱状的丝状体，直的或弯曲的，没有胶鞘。

(3) 鱼腥藻属 (*Anabaena*): 个体为多细胞的分枝的丝状体，在水中浮游的种类为单独的个体。在池塘湖泊中大量繁殖形成“水华”。这一属藻类具有很强的固氮能力。

2. 绿藻门

这是单细胞或多细胞的丝状体或片状体，含有叶绿素和黄色素。其中有较大型的如水绵极易看见，也有象小球藻、栅藻等必须用显微镜才能看见。这种藻类大部分盛行于春秋两季，能使水变绿，有的使水产生青草或鱼腥气味。本门常见的有衣藻属、小球藻属、栅藻属、水绵藻属、鼓藻属等。

(1) 衣藻属 (*Chlamydomonas*): 为球形、椭圆形或梨形的单细胞，能自由游动的绿藻，细胞前端有两条鞭毛，常在湿土或水边形成大片绿色胶团。雨后气温较高，光照条件良好时可大量繁殖起来。

(2) 小球藻属 (*Chlorella*): 又称绿粒藻，细胞为圆或椭圆形，直径3~5微米，有一个周生的环状色素体，呈绿色。

小球藻在有机质多，氮、磷条件较好时，适温 $15\sim 25^{\circ}\text{C}$ 能迅速繁殖，可以因其含丰富的蛋白质而作为饲料或人造肉精，也可以用来处理污水。

(3) 栅藻属(*Scenedesmus*)：它的集结体是平板状，由4~16个细胞连接而成，形如木栅，故得其名。这种藻一般在温度较高、营养较丰富的水中生长，繁殖迅速，也可以作饲料。

(4) 水绵属(*Spirogyra*)：是一种不分枝的丝状体，色素呈长带状，螺旋形环绕于细胞腔内。水绵在湖边、海滨、池塘、水田、沟渠等处都可生长繁殖，时常有一大群浮于水面，手摸有柔滑感。

3. 硅藻门

这类藻是单细胞植物，主要特征是细胞壁上有大量的硅质，形成一个由两片合成的硅藻壳。形态多种多样，但可划分为两个基本类型：(1) 辐射型，具有辐射对称的形态；(2) 羽纹型，具有左右对称的形态。

硅藻盛行于春秋及初夏，当大量繁殖时，水呈褐色或金黄色。普通硅藻产生香气，有的也产生鱼腥气味或泥土味。

(1) 舟形硅藻属(*Navicula*)：壳体对称，两端圆，两边平行，上下壳面具有壳缝，主要长于淡水中。

(2) 纺锤硅藻属：壳体三面对称，呈纺锤形，壳锋明显。

(3) 丝状硅藻属：细胞柱状、由许多细胞以瓣面相连接成丝状体，在池塘中常见。

(4) 旋星硅藻属：呈辐射状。

另外象金藻门中的拟黄团藻、黄群藻等，能使水味变苦，甲藻门的一些藻类能使水产生鱼腥味。

上述藻类中，除绿藻中的衣藻、小球藻、栅藻可用来培养，利用其光合作用作为污水处理的有效方法外，其他藻类大量繁殖生长都会给集中供水系统带来消极作用，需要加入硫酸铜或漂白粉等灭藻。

几种藻类形态见图2-2-11。

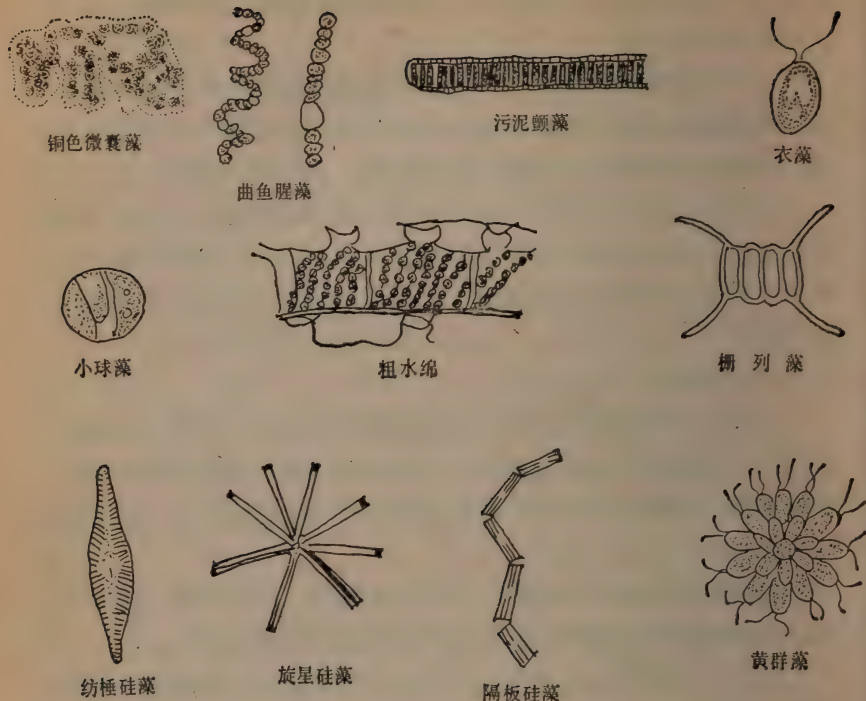


图 2-2-11 藻类形态

(二) 藻类在水处理中的应用研究

藻类在氧化塘中的作用，国外学者早已有所研究。近年来，我国一些单位开始了这一方面的研究和试验，获得了一定的结果。

湖北水生生物研究所 (1978) 的资料指出，藻类可以去除腈纶废水生化处理出水中的氨氮。他们选用四种藻类进行试验，发现席藻 (*Phomidium*) 在废水中生长良好，对废水中的其他毒物有一定的忍受力，沉降性能良好。其中变鞘席藻 (*P.ambiguum*) 去除氨氮的效果最好，一次进水方式去除率为 2.5~3.0 毫克/升/小时，连续进水方式去除率为 1.5~1.6 毫克/升/小时。同年该所

的研究资料还表明,利用刚毛藻科的丝状绿藻四级串联处理含汞量为4.0毫克/升的污水,停留时间共计24小时,总去除率达94%,而且认为藻类对汞的去除与光合作用无关,是表面吸附与细胞积累作用的结果。另外,山西大学生物系与有关单位也进行了藻类处理印染污水的试验。这些试验虽然是初步的,但为废水处理开辟了新的途径,因此值得进一步试验研究,使藻类在废水处理和环境保护工作中起到应有的作用。

第三章 植物与环境保护

近年来,关于植物对环境保护作用的研究,已经确认植物不仅能够调节气候、保护农田和保持水土,而且能够净化空气、净化污水、减弱噪声和监测大气污染,对环境保护起着重要的作用。本章主要介绍我国近年来关于植物对环境保护方面的试验研究资料,供有关方面参考。

一、植物对空气的净化作用

空气对于地球上的一切生物都是不可缺少的,它和人类、生物有着密切的关系,因此,大量排放烟尘,会使空气受到污染,严重地影响人类健康及绿化植物和农作物的生长。大气污染可以影响生物,而植物对空气则有净化的作用,它是一种大气的生物净化器。

(一) 吸收二氧化碳,放出氧气

CO_2 是一种大气污染物质,虽是无毒气体,但当空气中 CO_2 浓度达到0.05%时,人的呼吸已感不适,当含量达到0.20~0.60%时,对人体就有害了。

地球上的绿色植物是 CO_2 的消耗者,也是氧的加工厂。植物通过光合作用吸收 CO_2 放出 O_2 。又通过呼吸作用吸入 O_2 放出 CO_2 。但由于光合作用吸收的 CO_2 要比呼吸作用排出的 CO_2 多20倍,因此总的计算是消耗了空气中的 CO_2 。据估计,地球上60%以上的 O_2 来自陆地上的植物,特别是森林。

植物吸收 CO_2 的能力很大,其叶子形成1克葡萄糖需要2500

升空气中所含的 CO_2 。在进行光合作用时，每平方米的向日葵叶面，每小时能吸收0.14立方厘米 CO_2 。尽管如此，世界上的森林仍然是 CO_2 的主要消耗者，通常一公顷阔叶林在生长季节一天可以消耗一吨 CO_2 ，放出0.73吨 O_2 。生长良好的草坪也有吸收 CO_2 的能力。由此可见植物对空气起了调节作用。这也就是人们在绿树成荫的地方感到空气特别新鲜的原因。

(二) 吸收有害气体

所谓有害气体，主要是二氧化硫、氟化氢、一氧化碳等气体状态的物质。

1. 吸收 SO_2

SO_2 在有害气体中，数量多，分布广，危害大，当大气中 SO_2 浓度达到400ppm时，可使人迅速死亡。

表 2-3-1 一些绿化树木叶中的含硫量^[4]

树 种	含硫量 (占叶片干重%)
悬 铃 木	0.83
梧 桐	0.73
女 贞	0.48
大 叶 黄 杨	0.39
泡 桐	0.34
杨 树	0.32

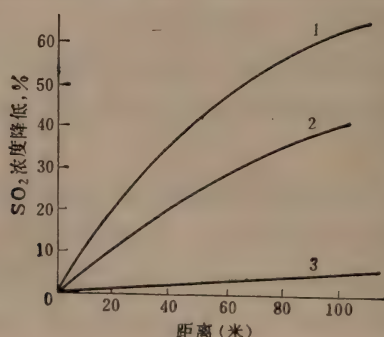


图 2-3-1 绿化树木吸收 SO_2 的效应^[14]

1— SO_2 笼罩的林地；2—平时林地；3— SO_2 笼罩与不笼罩下的无林地

植物由于叶面积大，所以对 SO_2 有较强的吸收能力。江苏省植物研究所等单位曾测定了绿化树木吸收 SO_2 的能力，所测结果如表2-3-1和图2-3-1所示，一般都比对照植物含硫量高。

日本大阪市的一些绿化树木叶片含硫量的测定，也说明了绿化树木对 SO_2 的吸收能力。

一般说，由于植物吸收了 SO_2 ，所以在 SO_2 污染区植物叶含硫量比正常的叶子含硫量高出5~10倍。植物吸收 SO_2 以后，便形成亚硫酸及亚硫酸盐，然后又以一定速度将亚硫酸盐氧化成硫酸盐。只要大气中 SO_2 浓度不超过一定的限度，则植物叶片不会受害，并能不断地吸收大气中的 SO_2 ，所以植物是大气的天然“净化器”。

植物吸收 SO_2 的能力和速度与大气中 SO_2 的浓度，污染的时间，环境条件如温度、湿度等以及植物种类不同而不同。一般大气中 SO_2 的浓度高，则植物吸收 SO_2 的速度快，数量大，但过高的浓度可使叶片受害，影响对 SO_2 的吸收； SO_2 污染的时间越长，植物吸收 SO_2 的量也越大，但超过一定时间，如植物不能忍受时，则因叶片受害而停止吸收；温度、湿度高时也能增加植物对 SO_2 的吸收；植物不同，吸收 SO_2 能力也不同。据报导1公顷柳杉每年可吸收720公斤的 SO_2 ；落叶松在一年内吸收 SO_2 的数量约相当于针叶松的4倍。

2. 吸收HF

正常植物叶片含氟量在25ppm（干重）以下，在氟污染区，植物吸收氟化氢而使含氟量大大提高，有时高达几倍或几十倍。美国有人研究100种植物，证明所有被研究的植物都能吸收氟化物，如菜豆、菠菜、矮天牛等可含氟化物200~500ppm而不受害。江苏省植物研究所资料指出，在绿化树木中，泡桐、梧桐、大叶黄杨、女贞等抗氟和吸氟能力都比较强，是良好的净化空气树种。加拿大杨吸氟能力很强，但它的抗性能力较差，只能在氟污染较轻地区种植。因此，在氟化氢气体排放的工厂附近种植吸氟植物，是可以起到净化空气效果的。几种植物吸氟情况见表2-

表 2-3-2 几种植物吸氟量 (ppm) 比较⁽⁴⁾

植物种类	含 氟 量	对 照 植 物 含 氟 量	与对照植物的差 值 (吸氟量)	受 害 症 状
美 人 蕉	146.0	7.95	138.0	叶缘稍有枯焦
向 日 葵	112.0	3.71	108.3	叶缘稍有枯焦
泡 桐	106.0	10.90	95.1	无症状
加拿大白杨	95.0	10.70	84.3	叶发黄
蓖 麻	89.4	2.99	86.4	叶缘枯焦
梧 桐	68.4	12.00	56.4	无症状
大 叶 黄 杨	55.1	6.25	48.4	无症状
女 贞	53.8	5.56	48.2	无症状
桦 树	45.7	12.60	33.1	无症状
垂 柳	37.8	16.70	21.1	无症状

注：植物样品均采自距离污染源350米处。对照植物采自江苏省植物研究所。

表 2-3-2 说明各种植物都有不同程度的吸氟能力。植物吸收、积累污染物的能力是很强的，有的植物能将氟化物富集20万倍，具有潜在性的生态影响，可使本来在环境中的低浓度污染物达到有害的浓度，使污染物从环境中进入生物链。由于氟化物对人、畜有害，所以在这些工厂附近不宜种植食用植物，而应多种植非食用的绿化树木。

此外，植物对氯气、二氧化碳等均有不同的吸附和积累能力。

(三) 吸滞尘埃

粉尘也是大气污染的重要指标之一，据统计，地球上每年降尘量达 $1 \times 10^6 \sim 3.7 \times 10^6$ 吨，这些粉尘中包含着各种无机物 and 有机物以及微生物和病原菌等。人们处在灰尘污染的环境中，容易患气管炎、支气管炎、矽肺、肺炎等疾病。

植物，特别是树木，对烟灰、粉尘有明显的阻挡、过滤和吸附作用。不同植物对粉尘的阻挡率是不一样的，例如柏树为12.80%，洋槐为17.58%，白桦为10.59%，花椒为9.99%，松树

为2.32%。森林对有害烟尘或粉尘具有很大的阻留作用。一年中每公顷的森林阻留灰尘的总量为：云杉为32吨，松树34.4吨，水青岗68吨。据日本测定，每公顷槭树和橡树混交林，每年每公顷可摄取尘埃68吨。

根据我国研究，认为刺楸、榆树、朴树、重阳木、刺槐、臭椿、构树、悬铃木、女贞、泡桐等，都是比较好的防尘树种。

总之，绿化植物的吸尘作用是肯定的，但吸尘的效率与树种、林带的高度和宽度、绿地面积大小和种植密度等因素之间的关系，尚待深入去研究。

(四) 杀菌

空气中散布着各种细菌，绿化树木可以减少各种细菌在空气中的数量，其原因一方面由于绿化地区空气中的灰尘少而减少了细菌，另一方面植物本身有杀菌的作用。

早已发现许多植物，如洋葱、大蒜能分泌一种杀菌素，其它如桦木、新疆圆柏、银白杨、柠檬、地榆根等均有杀死微生物的作用。

不同类型的林地和草地的减菌作用如表2-3-3所示。

表 2-3-3 不同林地和草地的减菌作用

类	型	每立方米空气含菌数
松树林	(黑松)	589
草地	(细叶结缕草)	688
柏树林	(日本花柏)	747
樟树林		1218
喜树林		1297
麻栎林		1667
杂木林		1965

在城市绿化树种中，具有很强杀菌能力的种类有：黑胡桃、柠檬、悬铃木、桧柏属、橙、茉莉、柏木、白皮松、柳杉、雪松等，其它如臭椿、马尾松、杉木、侧柏、樟树、黄连木等也有一定的杀菌作用。因此，城市绿化也是减少空气中细菌污染与传播

的一项重要措施。

(五) 减弱噪音

在城市中，由于噪音常常使居民身心健康受到影响，生活不得安宁，在资本主义国家噪声已成为城市的主要公害之一。消除噪音的根本办法是在噪声源上采取措施，但加强城市绿化，建造防声林带等辅助措施，也有一定的作用。据测定，40米宽的林带可以减低噪音10~15分贝。日本材料指出，在公路两旁各留15米造林，以乔灌木搭配可降低噪声一半。在城市的公园中，成片树林可把噪声降低到26~43分贝，使之接近于对人无害的程度。

根据我国南京地区的试验测定，认为绿化植物减弱噪声的效果与防声林带的宽度、高度、位置、配置方式以及树木种类等有密切关系。

(1) 林带宽度：在城市中最好6~15米，在郊区可以更宽一些，最好15~30米。如能建立多条窄林带，效果会更好。

(2) 林带高度：林带中心的树行高度最好在10米以上。

(3) 林带长度：防声林带的长度大致应为声源至受声区距离的两倍。

(4) 防声林与声源的距离：防声林应尽量靠近声源而不要靠近受声区，这样效果好。一般林带边缘至声源的距离应在6~15米之间。

(5) 林带的结构和配置：林带以乔木、灌木和草地相结合。形成一个连续、密集的障碍带，树种应选择较高大的，树叶密集的，叶片垂直分布均匀的乔木。也可以以小乔木、矮灌木与草地配合。同时，认为常绿树种防声效果更好。

城市住宅区可以用一排茂密的灌木，其后加一排高大乔木来隔离噪声。

工厂应结合厂区绿化栽植防声林，以保护生活区与办公室少受噪声骚扰。

比较好的隔声树种有：

(1) 乔木类：雪松、桧柏、龙柏、水杉、悬铃木、梧桐、

垂柳、云杉、薄壳山核桃、柏木、臭椿、樟树、榕树、柳杉、栎树等。

(2) 小乔木及小灌木类：珊瑚树、海桐、桂花、女贞等。

(六) 吸滞放射性的物质

绿化树木不但能阻隔放射性物质和辐射的传播，并能起到过滤的作用。国外试验表明，在有放射性污染的厂矿周围，设置一定结构的绿化林带，在一定程度内可以防御和减少放射污染的危害。例如，杜鹃花科的一种乔木，在中子——伽玛混合辐射剂量超过 15000 拉德时，仍能正常生长，可见它对辐射的抵抗力是比较强的。有的资料指出，针叶林净化放射性污染的能力比常绿阔叶林低得多。

二、植物对有害气体的抗性和吸收能力

各种有害气体能对植物产生明显的危害，但不同植物的反应是不同的，究其原因主要是植物本身对有害气体的抗性与敏感性不同。

(一) 植物对有害气体的抗性

江苏省植物研究所曾对 60 多种木本植物的实生苗进行了 SO_2 的人工熏气试验。根据经 20 ppm SO_2 熏气后的受害叶面积的百分比，分为 4 级：Ⅰ级——抗性强，受害叶面积为 0~7%；Ⅱ级——抗性较强，受害叶面积为 7~25%；Ⅲ级——抗性中等，受害叶面积为 25~65%；Ⅳ级——抗性弱，受害叶面积为 65~100%。

美国曾对 300 多种植物进行了多年试验，以对 SO_2 最敏感的紫花苜蓿的指数作为“1”，把指数在 1.5 以下的植物叫敏感植物；指数在 2.6 以上的叫抗性植物；大多数植物指数在 1.6~2.5 之间，属于反应中等的植物（表 2-3-4）。

日本和西德调查研究了树木对 SO_2 的反应，他们发现抗性强的有夹竹桃、日本女贞、海桐、大叶黄杨、女贞、棕榈、冬青、梧桐、银杏、刺槐等；抗性中等的树木有障树、垂柳、桃、苹果、李、杨树等；抗性弱的有日本赤松、雪松、柳杉、悬铃木、核桃等。

植物对氯气和氟化氢的抗性也不同。对氯气抗性较强的有青

冈栎、棕榈、板栗、大叶黄杨、广玉兰、海桐、女贞、夹竹桃等；抗性中等的有白玉兰、柳杉、槐树、喜树等；抗性弱的有池柏、木兰、马尾松、杜仲等。对氟化氢抗性强的有构树、臭椿、大叶黄杨、女贞、梧桐、石榴、四季豆、芹菜等；抗性中等的有泡桐、悬铃木、枣、苹果、柿、玉米、高粱等；抗性弱的有唐菖蒲、雪松、葡萄、梅、金荞麦等。

表 2-3-4 植物对SO₂ 毒害反应的比较*

敏 感 植 物		反 应 中 等 植 物		抗 性 植 物	
植物名称	指 数	植物名称	指 数	植物名称	指 数
紫花苜蓿	1.0	蒲公英	1.6	美人蕉	2.6
紫茉莉	1.1	番 茄	1.7	马 铃 薯	3.0
莴 苣	1.2	苹 果	1.8	蓖 麻	3.2
燕 麦	1.2	黄 金 树	1.9	紫 藤	3.3
向 日 葵	1.3~1.4	包 菜	2.0	忍 冬	3.5
南 瓜	1.4	豌 豆	2.1	木 槿	3.7
小 麦	1.5	秋 海 棠	2.2	黄 瓜	4.2
		桃	2.3	芹 菜	6.4
		鸢 尾	2.4	女 贞	15.0
		李	2.5		

* 引自江苏省植物所等编著《防污绿化植物》，科学出版社，1978年。

由上述结果可以看出，各种植物对环境污染的抵抗能力是不相同的，但有些植物对不同气体的抗性是一致的，例如对二氧化

表 2-3-5 植物对不同气体的抗性比较

植 物		二 氧 化 硫	氟 化 氢	二 氧 化 氮	臭 氧
柑	桔	强	中	—	—
木	槿	强	—	弱	—
银	槭	强	中	—	弱
	杏	中	弱	—	—
葡	萄	中	弱	—	弱
	梨	弱	强	—	—
紫	花 苣 蓿	弱	弱	—	弱
唐	菖 蒲	强	弱	—	—

硫抗性强的植物，对氯气、氟化氢等的抗性也比较强。另外也有些植物对不同气体具有不同的抗性（表2-3-5）。

（二）植物对有害气体抗性原因的分析

据国内外的一些研究结果看，植物的抗性与植物的某些生物学特性有关。一般抗性强的植物有以下特点。

1. 叶片结构与抗性

通常抗性强的叶片较厚、革质，外表皮角质化或表面具有蜡质层，气孔较少，叶背面多毛等。这些结构特征都不利于有害气体的进入，因而有利于植物对有害气体的抵抗。

2. 植物的生理特性与抗性

有些植物能吸收大量的 SO_2 或 HF ，是由于其生理上具有积累、转移、消耗、抗御污染物质的能力；有的植物在不利条件下能关闭气孔，暂停气体交换等，均可使其抗性增强。

3. 植物再生能力与抗性

有些植物（如构树和女贞等）在受到气体危害后易于恢复，因而在污染区可以表现出顽强的生存能力。

当然，植物的抗性除过本身的特性外，尚与生长发育阶段、对环境的适应性和环境条件都有密切的关系。

（三）植物对毒气的吸收能力

在评价一种植物在环境净化中的作用时，不但要看它在不良环境中的生长情况，还要看它对有害气体的吸收能力如何。这一方面主要是通过对污染区植物叶片成分分析，来了解其对毒物的吸收能力。吸收氟能力最强的植物有美人蕉、向日葵、蓖麻等草本植物。泡桐、梧桐、大叶黄杨、女贞等树木吸氟和抗氟能力都比较差。

植物对 SO_2 的吸收能力以悬铃木吸收硫最强，但抗性较差；构树吸硫能力最差。其它如梧桐、女贞等均有较好的吸硫能力。

植物的上述特性，都是在防污绿化植物选择中应当注意的，特别是在工矿区绿化中应作为参考依据（见附录四）。

三、植物对污水和土壤污染物质的吸收和积累

(一) 植物对有机毒物的吸收代谢

1. 高等植物对酚类化合物的吸收、积累和代谢。

(1) 高等植物对外源酚的吸收、积累和代谢

高等植物具有形成和积累酚类化合物的固有特性，而且以多元酚及其衍生物为主要形式，这些酚类化合物在其生命活动中起着重要的作用。除此之外，高等植物还从含酚的水或土壤中吸取外源酚。外源酚进入植物体后，很少以游离状态存在，大多数与其它物质形成复杂的化合物，最常见的是酚糖苷。当酚形成糖苷之后，则酚类物质的解偶联作用和对细胞的损害作用被消除，从而解除酚对植物的毒害。上述情况仅限于酚类化合物浓度较低的情况下。

植物还有吸收苯酚并将其转化的能力。据报导，以标记 ^{14}C 的苯酚溶液(1000毫克/升)从根部供给茶树、葡萄、玉米、菜豆等作物幼苗，在黑暗条件下24~48小时，这些植株吸收苯酚，并将其一部分转化成 CO_2 放出。

各种植物对酚类化合物的吸收和积累能力也不同，以含酚废水灌溉为例，种子含酚量以小麦最低，糙米稍高，玉米最高。而且随浓度和灌溉次数增加而增加。

根据栽培试验，水初含酚量一般成熟期高于营养期。水稻不同器管的含酚量，其规律为茎叶中最多，根次之，糙米中最少。

(2) 高等植物对含酚废水的净化作用

表 2-3-6 植物净化单元酚的能力

植物种 (每100克)	10 小 时	50 小 时	100 小时
盐生灯心草	108	净化酚的浓度(ppm) 132	204
灯心草	94	164	230
水 葱	65	118	202

利用植物对酚的吸收，积累和代谢的特性，可以净化废水。

据试验,灯心草,盐生灯心草和水葱都能净化污水中的单元酚,其净化能力见表2-3-6。

此外,在18~20°C条件下,水葱50小时内可全部吸收5升水中10ppm的酚。甚至浓度高达600ppm时,都能被水葱吸收,而且发育还比无酚水中要好。

水葱具有庞大的气腔和强大的根茎,生活力比较强,植株表层含有一层蜡质,干枯植株漂浮于水面,可被水浪带到岸上,水葱吸收的酚不重返水体和沉积于淤泥中,对污水起良好的净化作用。水葱还能降低水体的生化需氧量,对酸、碱性污水有一定的耐性。有的试验证明,两天内降低高锰酸钾耗氧量70~80%;两星期内生化需氧量降低了60~90%。因此水葱净化污水,相当于微生物的净化作用,能提高水体的自净能力。据报导,芦苇也有净化含酚废水的能力。每100克鲜芦苇在24小时内,能将8毫克酚代谢为 CO_2 。

2. 高等植物对氰的吸收、代谢和积累

自然界中氰化物一般分为有机氰和无机氰两大类。不同的氰化物之间可以互相转化。

有些高等植物,如高粱、木薯、苦杏仁、白果等自然存在着氰与糖的结构——氰糖苷。近年来由于同位素 ^{14}C 和 ^{15}N 的应用,比较清楚地了解了高等植物体内氰化物的代谢过程。如前所述,氰与丝氨酸结合而形成腈丙氨酸,依次转化成天冬酰胺及天冬氨酸。这些物质是植物细胞内正常存在的代谢产物。因此在一定范围内,氰不构成对植物的毒害。当浓度提高时,由于代谢作用受到限制,对植物生命活动产生了抑制作用。

氰化物在植物体内积累,随浓度增加而增大,但一般积累并不太高。其中以根部积累较多,茎叶次之,种子最少,不同发育期也有差异。

从上边所讲的材料来看,外源酚、氰化合物进入植物体后,在正常情况下可能形成糖苷,从而解除了对细胞的毒害作用,同时经过一个诱导期之后,植物细胞有能力利用这些物质,参加细

胞内的正常合成和分解代谢过程。高等植物的解毒能力首先表现在形成糖苷，并将其贮存在特有的液泡之中，即被植物吸收的有毒物质大部并未消失，而变成了对植物细胞的结合态。这些结合态的有毒物质在植物体内生长发育过程中可以被分解和利用。其中一部分可能始终残存于植物体中。

但是，植物对酚、氰的代谢、积累能力有多大，需要什么外界和内在的环境条件则研究尚少，尤其是酚的代谢不止一条途径，它取决于何种因素，都不清楚，有待进一步的研究。

3. 植物对有机氯农药的吸收和积累

水生植物通过根系或植物体表面，特别是通过毛细管作用，把农药吸收到植物体内，并浓缩起来。根据有关资料，将一些水生植物对水中有机氯农药的吸收和浓缩的情况列于表2-3-7。由表中的数据可以看出，水生植物对农药的吸收，要比旱地作物高得多，其中以蓼属为最多，浓缩倍数高达10万倍。

表 2-3-7 水生植物对水中有机氯杀虫剂的浓缩情况

植 物	杀 虫 剂	水中含量 (ppb)	植物体内含量 (ppm)	浓缩倍数
水生植物	毒杀芬	0.41	0.21	512.0
水生植物	DDT	200.00	75.0	375.0
水生植物	DDT	20.0	31.0	1550.0
眼子菜科	DDT, 毒杀芬, 甲氧DDT	0.45	1.0	2220.0
眼子菜科	DDT, 毒杀芬, 甲氧DDT	0.35	1.1	3171.0
眼子菜科	DDT, 毒杀芬, 甲氧DDT	0.23	0.8	3478.0
蓼 属	DDT, 毒杀芬, 甲氧DDT	0.30	30.3	100000.0
藻类苔类	DDT	0.33	0.01	33.0
藻 类	DDT	5.8	0.002	0.34
藻 类	氯 丹	6.6	0.013	1.97
藻 类	异狄氏剂	10.5	0.007	0.66
维管束植物	DDT	5.8	0.003	0.52
维管束植物	氯 丹	6.6	0.003	0.45
维管束植物	异狄氏剂	10.5	0.006	0.57

(二) 植物对有毒重金属的吸收和积累

关于重金属对植物的毒害和植物对重金属元素的吸收和积累了解得很少，现作简要介绍。

植物能从土壤中吸收各种污染物质，而且进入植物体内也有一定的分布规律和残留含量的顺序：根>茎>叶>穗>壳>种子。

1. 镉

镉是一种毒性较强的金属。植物可以通过根系从土壤中吸收镉，并转运到植物体内各部分。如萝卜吸收的镉多转运到叶子中，根部积累较少。而水稻在根部积累最多，茎、叶次之，稻谷中最少。植物不同，吸收镉的能力也不同。如白栎和山核桃相比，后者灰分中镉量比前者大5倍。

根据中国科学院林业土壤研究所（1978年）应用放射性同位素¹¹⁵Cd进行的水稻试验，其各部位镉含量见表2-3-8。从表可见水稻地下部（根）积累的镉为164微克/盆，占植株吸收总镉量82.5%，地上部只积累35.11微克/盆，占总镉量的17%。而地上各部位的分配次序为茎>叶+叶鞘>穗轴>稻壳=糙米。

此外，水生植物浮萍，岸边生长的河柳等都有吸收和积累镉的能力。

2. 铬

在自然界，铬通常是二价和三价或六价，而生物体内主要是三价铬。

试验发现，铬可以通过根和叶进入植物体内。黑麦、小麦和玉米通过根冠吸收三价铬，而不需要通过根毛，玉米的根也没有根毛。在大豆和莴苣上喷洒 CrCl_2 和 Na_2CrO_4 ，发现铬渗入叶片，并积累在处理区域内，未见铬在植物体内的转移。

当植物周围环境中铬含量较大时，一般植物体内的铬含量也较大。例如含铬工业废水灌溉的胡萝卜中含铬量比河水灌溉者高10倍，西红柿高2倍，甘蔗高3倍。这些都说明某些植物对铬有吸收积累的特性。

浙江农业大学等（1978）曾应用⁵¹Cr对水稻进行试验，结果

表 2-3-8 成熟期水稻各部位中镉的分布状况*

植株部位	吸收镉总量 (微克/盆)	放射计数 (脉冲/分) (1克干物)	含镉量 (微克/1克干物)	含镉量 (%)
叶 + 叶鞘	—	148	0.67	3.7
茎	—	375	1.70	8.9
穗轴	—	44	0.20	1.1
稻壳	—	37	0.16	0.9
糙米	—	35	0.15	0.8
植株地上部	35.11 (17.5%)			
植株根系	164.00 (82.5%)	3540	16.12	84.5

* 陈铨荣、石英：《环境科学》，1978年第三期。

表 2-3-9 铬在稻株各部分的分布*

灌溉水中铬浓度 (ppm)	水稻各部位的含铬量 (ppm)			
	糙	米	谷	叶
Cr ⁺³	0.5	0.125	0.600	2.250
Cr ⁺³	10	0.150	0.920	4.450
Cr ⁺³	25	0.190	2.400	10.400
Cr ⁺³	50	0.220	2.400	19.700
对照 (未加铬)		0.140	0.660	2.000
Cr ⁺⁶	0.1	0.155	0.760	2.600
Cr ⁺⁶	10	0.220	0.810	5.100
Cr ⁺⁶	25	0.375	1.350	7.500
Cr ⁺⁶	50	0.930	2.500	26.600

* 陈传群等：《环境科学》1978年第一期。

表明地上各部位含铬量随灌溉水中铬浓度的提高而增加。而稻草中含铬量占整个地上部的90%左右，谷壳约占5%，糙米占3%左右（表2-3-9）。

3. 砷

地衣喜生于砷富集的地区，所以有些国家利用地衣作为砷污染的指示植物。

砷在植物中的积累随浓度增高而增加，且以根部的含量最高，茎叶比根部为低，果实最低。作物不同，对砷的吸收也不同，水稻吸收和积累砷最多，尤其在根部，其次为小麦，玉米吸收最少。

4. 汞

汞进入植物体内有两条途径，土壤中的汞化合物常变为甲基汞或金属汞后为植物根所吸收。叶片所吸收的汞主要是喷洒的农药，雨水和尘埃中以及在土壤中的汞蒸汽。叶片的气孔能够吸收和排除汞。由叶片进入植物体内的汞，均可被运转到植物的其它部位，如块根和果实。

汞在植物体内的积累与汞化合物的类别及浓度有关。如将低浓度氯化亚汞和氯化汞施入土中，土豆、胡萝卜、莴苣及豆类中汞量很低；若将醋酸汞、醋酸苯汞施入土壤中，豌豆根中则有汞的积累。水培试验证明，随汞浓度增加，植物各部分汞含量上升，且以根中含量最高，茎叶相对较低，果实最少。这主要由于汞被植物根吸收后，常与根中的蛋白质发生反应而沉积于根上，根少向地上部分转输的缘故。这些结果说明植物对汞具有相当的吸收和积累能力。当然不同植物对汞的吸收积累能力有着显著的差别。

5. 硒

植物从土壤中吸收硒，并把它转变成可溶性化合物。植物吸收和积累硒的能力，大致可分为三大类：（1）能吸收积累大量硒的植物，其吸收量可达1000~10000ppm，如紫云英，这个属有200多种植物，是硒的积累者。（2）能吸收几百ppm的植物，如滨藜。（3）大部分栽培的作物，谷类和天然禾本科草吸收积累硒

的量较少，最多的只达30ppm。

硒在植物内的分布特点是地上部分含量高于地下部分，幼年植物根中含量低于成年植物。

从上述资料来看，植物具有吸收积累重金属的特性。植物从土壤或水中吸收重金属，大部分积累于根中，只有一小部分输送到地上部分，植物对这些元素的吸收，受土壤中各种条件的影响，因此，植物虽能从土壤中吸收积累重金属，但若要用植物净化土壤，问题比较复杂，一般来说是比较困难的。原因是植物根大部分残留在土壤中，被根吸收积累的重金属，可能返回土壤中；而植物的茎叶常又通过沤肥或秸秆还田及动物的粪便返回土壤，因而，难以得到净化。但一些吸收积累重金属能力强的植物，由于植物残体可以从水中清出或沉积在淤泥中，所以对污水的净化可起一定的作用，但这方面问题尚待进一步研究。

在结束本节时，我们还得提到植物对减少水中细菌方面的作用。森林不但能够减少空气的细菌数量，而且也可以减少水中细菌的数量。据报导，在通过30~40米宽的林带后，1立升水中所含的细菌数量比不经林带的减少1/2。通过50米宽的30年生的杨、桦混交林后，细菌数量减少9/10以上。从榆及金合欢林流向水库的水中，大肠杆菌数目减少9/10；而从松林中流出的水中，大肠菌只有原来的1/18；从栎林、白蜡和金合欢混交森林中流出的水中，大肠菌数目只有原来的1/23。

一些水生植物也具有减菌作用。水葱、田蓊、水生薄荷等能杀死水中的细菌。根据试验，将这三种植物放在每毫升含细菌600万个的污水中，2天后大肠杆菌消失。芦苇、小糠草、泽泻等也有一定的杀菌能力。

四、城市、工矿区防污绿化问题

城市绿化是我国社会主义城市建设和环境保护工作的重要组成部分，它对改善生产、生活环境，提高人民健康水平，美化城市等方面有着重要的意义。从改善环境、保护人民身体健康来看，城市绿化的主要作用是可以净化城市空气、减弱噪音、改善

城市小气候，以及对机体起到良好的作用。现在简单介绍与环境保护有关的城市绿地的类型和配置，城市防污绿化植物的选择原则与要求，以及防止绿化植物受环境污染危害的措施等。

(一) 城市绿地的主要类型和配置

城市和工矿区的绿地类型主要包括公园、花园、小游园、林荫道、街道行道树、防护林带和宅旁绿化等。每种类型的绿地常由各种不同的栽植形式与适当地配置组合而成。例如林荫道多数由几行乔木林带、绿篱、小草坪和花坛组成，一个丰富多采的大型公园，几乎包括了所有的栽植形式，共同构成了一个完整的绿地生态系统。

然而，城市绿地怎样分布对改善环境最为有利呢？这就是所谓的绿地配置或布局问题。

对城市和工矿区的专门绿地，应根据它们的用途和具体自然条件来配置。总的原则应是分布均匀，联成系统，市区和郊区绿地相结合，从郊区导入新鲜空气，使其在改善城市环境中发挥更大的作用。有的认为城市理想的绿地配置方案应以市中心为圆心，以环形和放射性两种林带为骨架，构成环状放射形的林带系统网。但旧市区这种理想林带配置困难较多，可以采用不规则的绿地网为骨架，通过各种林带、绿地把城市郊区风景游览绿地、防护林带、农田等与城市公园和其它公共绿地联系起来，也可达到改善城市小气候和对人体健康起到良好的作用。

城市绿地对环境保护的作用，现在已引起国内外的普遍重视，规划和配置好新建城市的绿地，有计划地改造旧城市的绿地，都是城市建设和环境保护的重要任务。需要认真地加以研究。

下边举一些不同类型工厂防污绿化的实例，供作参考。

1. 重工业工厂。如大型炼铁企业，厂区面积大、生产程序复杂、车间分散、厂内堆积原材料和产品较多，各种车辆来回运输频繁，并受到一定程度的有害气体影响，为绿化带来一定的困难。因此，首先应在生活居住区、行政办公室、厂周围及主干道进行绿化，周围空地较多的车间也可以先绿化，树种以速生高大

乔木为主。

2. 轻工业工厂。这类工厂绿化条件较好，通常可以在厂区大门内两侧布置成花坛或绿地，其余一般密植高大乔木，在道路两旁可种植灌木和绿篱。

3. 受有害气体危害的工厂。在有害气体污染与生活居住区、行政办公室之间必须设置较宽的隔离林带。在污染区尽量栽种抗毒能力强的树种，在行政办公室和生活区应多种植净化能力强的树种。

4. 在有粉尘污染的工厂。在粉尘污染源与生活区、办公室之间设置高大阔叶乔木林带，以阻挡和吸滞粉尘。

5. 有噪声污染的工厂。应在发生噪声的车间周围设置较宽的防护林带。或在声源与办公室和生活居住区之间设置几道窄林带，形成一个较宽的隔声区。

(二) 城市、工矿区环境保护绿化植物的选择原则和要求

要搞好防污绿化，必须选择适宜的植物种类。选择环境保护绿化植物的总的原则和要求应该是首先考虑抗污染，吸收有毒气体，净化空气，隔声遮阴降温等不同功能的要求；同时还要考虑具有一定的观赏价值；也要考虑绿化植物对当地气候、土壤条件的适应性及卫生要求等。作为优良的防污绿化植物应具备下列条件：

- (1) 具有较强的抗污染能力；
- (2) 具有净化空气的能力；
- (3) 具有对当地自然条件和城市工矿区的适应能力；
- (4) 容易繁殖、移栽和管理；
- (5) 有较好的绿化、美好效果与适合卫生要求。

当然，要真正具备这些条件是不容易的，但作为防污绿化来说，重点应该是考虑前两条，然后根据实际条件选择适当的防污绿化植物。根据江苏省植物研究所等单位的调查研究结果，兹将他们初选的一些常见环境保护绿化植物和防污染能力较强的树种列于附录四，供作参考。

(三) 防止绿化植物受环境危害的一些措施

虽然绿化植物对保护环境起到了积极的作用，但它本身也会遭到环境污染的危害。因此，如何防止或减轻环境污染对绿化植物的危害，也有着重要的意义。这方面的研究资料仍然不够充分，大体有以下几个方面：

(1) 培育抗污染能力强的植物品种。国外关于培育抗性树种及蔬菜品种，已进行了一系列的工作，如洋葱、菠菜、马铃薯、蕃茄等抗 SO_2 的品种。美国宾夕法尼亚州正在培育抗 O_3 及 SO_2 的欧洲赤松。美国和西德在培育杨树和松柏类抗烟品种方面也进行了一系列工作，发现杂交杨比一般杨树抗烟能力要强。总的说来，这方面的工作尚处于开始阶段，还需继续努力。

(2) 加强施肥管理以增强植物的抗性。如德、美等国家发现，增强氮肥，能减轻 SO_2 对树木的伤害。国外有的试验表明施钾肥区小麦减产18%，不施钾肥区减产60%。增施肥料还可以使受害植物加速恢复生长。江苏省植物研究所试验韭菜发生急性 SO_2 危害后，增施氮肥27天后鲜叶产量比未施肥者增加26.7%，54天后还比未施肥者增加15%。也有的报导，施用氮肥过多，反会降低抵抗有害气体的能力。

(3) 喷施化学物质。这一方面目前还都处于试验研究阶段。如用石灰乳、碳酸钡，或碳酸钙的悬浊液作展着剂，经常散布植物叶面，可以防止或减轻烟害。水稻撒布石灰乳剂能防止氟化物的危害，而且效果比较明显。波尔多液及石灰硫磺合剂也有效果。

国外有的研究指出，在叶子上喷维生素C，能提高植物的抗烟能力，而且发现抗坏血酸钠的效果更好。

江苏省植物研究所曾用0.5%的合成洗衣粉喷洒水稻、小麦等作物叶片，有减轻叶片受害的程度。同时还试验了洗衣粉喷洒雪松等枝叶，可以防止和减轻 SO_2 和 Cl_2 等气体的危害。

总之，这一方面尽管有一些试验结果，但实际应用尚有一定距离。

(4) 加强工厂“三废”治理, 减少环境污染。这是一个最根本的措施。

第四章 环境质量的生物学评价与监测

环境质量的自动监测和报警等技术的研制和应用已达到很高的水平。但没有生物学资料, 单凭理化数据, 是难以对环境质量作出准确评价的。生物能够集聚整个时期中环境因素改变的情况, 所以在检测环境因素变化全过程方面, 生物是一个理想的检测工具。基于上述原因, 环境质量的生物学评价与生物监测问题, 已日益为人们所注意, 并开展了不少工作。

近年来, 国外在污染方面的研究, 以水污染与水生生物之间的关系为题的调查研究很受重视。有关水污染的生物监测文章很多, 其中美国材料试验学会 (ASTM) (1977 年) 发表的《水和废水质量的生物学监测》会议论文集, 比较全面地介绍了各类水生生物在监测水污染方面的应用和技术。

我国自七十年代起, 环境污染评价研究工作十分活跃, 出版和正在编印有关资料汇编。湖北省水生生物研究所 (1978 年) 编辑的《环境保护生物监测与治理资料汇编》, 比较集中地反映了我国近年来关于水体污染生物监测方面的研究资料, 并在水域污染生物监测、评价的研究方面取得了不少成果。

本章主要介绍水体污染与大气污染方面的生物监测的基本内容。具体监测技术可参考其他有关资料。

一、水体污染生态学评价法

(一) 污水生物系统法

生物体与环境是一个统一体, 有什么样的环境, 就有什么样的生物, 所谓指示生物, 就是用生物的变化鉴别环境中出现的变化, 这里主要通过生物的变化来识别环境污染的状况。

早在 1909 年, Kolkwitz 和 Marsson 就提出了所谓的污水生物系统, 这个系统在欧洲大陆被广泛地接受作为评定水体污染的标准。该系统是建立在指示生物的基础上, 其理论基础是: 当河流

表 2-4-1 Kolkwitz和Marsson氏污水体系各带的化学和生物学特征*

项 目	多 污 带	α -中 污 带	β -中 污 带	寡 污 带
化学的过程	因腐败现象引起的还原和分解作用明显开始	水及底泥中出现氧化作用	到处进行着氧化作用	因氧化使矿化作用达到完成阶段
溶 解 氧	全 无	有 一 些	较 多	很 多
BOD	很 高	高	较 低	低
硫化氢的形成	有强烈硫化氢味	硫化氢味没有了	无	无
水中的有机物	有大量高分子有机物	高分子有机物分解产生铵酸	很多脂肪酸铵化合物	有机物全分解
底 泥	有黑色硫化铁存在, 呈黑色	硫化铁已氧化成氢氧化铁, 故不呈黑色		大部分已氧化
水 中 细 菌	大量存在, 每毫升水中达100万个以上	很多, 每毫升水中达10万个以上	数量减少, 每毫升水中在10万个以下	少, 每毫升水中在100个以下

* 引自津田松苗:《污水生物学》1964年。

续表 2-4-1

项 目	多 污 带	α -中 污 带	β -中 污 带	寡 污 带
栖息生物生态学特征	所有动物皆为细菌摄食者; 均耐 pH 的强烈变化; 耐低溶氧的嫌气性生物; 对硫化氢、氨等有强烈的抗性	以摄食细菌的动物占优势, 其他有肉食性动物, 对溶氧及 pH 变化有高度适应性; 大致能容忍氨, 对 H_2S 有弱的耐性	对溶氧及 pH 变动的耐性差, 对腐败毒物无长时间耐性	对溶氧及 pH 的变动的耐性很差, 特别对腐蚀性毒物 (H_2S) 的耐性差
植 物	无硅藻、绿藻、接合藻及高等植物出现	藻类大量发生, 有蓝藻, 绿藻、接合藻及硅藻出现	硅、绿、接合藻的多种种类出现; 此带为蓝藻的主要分布区	水中藻类少、但着生藻类多
动 物	微型动物为主, 原生动物占优势	微型动物占大多数	有多种多样	多种多样
原 生 动 物	有变形虫、纤毛虫, 但无太阳虫、双鞭毛虫及吸管虫	逐渐出现太阳虫、吸管虫, 但无双鞭毛虫出现	太阳虫和吸管虫中耐污性弱的种类出现, 双鞭毛虫也出现	仅有少数鞭毛虫和纤毛虫
后 生 动 物	仅有少数轮虫、蠕形动物、昆虫幼虫出现; 水螅、淡水海绵、藓苔动物、小型甲壳类、贝类、鱼类不能在此生存	贝类: 甲壳类、昆虫有出现, 但无淡水海绵及藓苔动物, 鱼类中的鲤、鲫、鲇等可在此带栖息	淡水海绵、藓苔动物、水螅、贝类、小型甲壳类、两栖动物、鱼类均有多种出现	除各种动物外, 昆虫幼虫种类极多

受到有机物污染后，发生一系列自净过程，河水渐清，生物种类发生变化，出现特有的指示生物。以各河段生物特征确定河流受污染的程度，依次将被污染的河流划分为四个不同地带，即多污带、 α -中污带、 β -中污带和寡污带。这个系统 后经 Liebm ann 和津田松苗等补充，日趋完善。各污染带的主要特征如表 2-4-1 所示。

因此，我们可以根据这个系统，将一条河流分成几段，采样分析特征种，就可对某一段有机污染的程度作出评价。

这个系统应用的对象主要是被生活污水污染的水域，而对重金属及其它毒物引起的污染还不能应用。

近年来许多研究者的兴趣集中于对大型底栖无脊椎动物及其组成情况的研究，用以评价河川受有机物污染的程度。下边介绍一下这些研究的基本情况。

1. 颤蚓类 (*Tubifex*)

这是一类底栖无脊椎动物，尤其是颤蚓科的种类，如霍甫水丝蚓 (*Limnodrilus hoffmeisteri*) 和苏氏 尾鳃 蚓 (*Branchiura Sowerbyi*)，在有机物丰富的淤泥中分布量很大，有些种 类还能忍耐缺氧环境，因此，在有机物污染严重并引起缺氧的水体（或叫多污带）这些寡毛类可以成为唯一的生物量极大的优势底栖动物群落。

颤蚓类的种群数量在一定范围随污染增加而增加，它的数量可以用作评价水体污染的状况。这一方面的工作可举例如下：

1955 年美国 Wright 在调查美国伊利湖污染的基础上提出以颤蚓类的个体数作为评价水质的指标即：

颤蚓类 <100 条/米 ²	扁蛭幼虫 >100 个/米 ²	不 污 染
100~999 条/米 ²		轻 污 染
1000~5000 条/米 ²		中 等 污 染
>5000 条/米 ²		严 重 污 染

北京动物所根据 1975 年在 W 河调查，发现污染段每平方米水蚯蚓可达 37600 条。而且认为，大型无脊椎动物的区系组成特征，

基本上可以作为评价水体受有机物污染的一个指标。以昆虫幼虫（摇蚊幼虫、鼠尾蛆等除外）占优势的水体是较干净的水体；以水蚯蚓和蚂蝗等环节动物为主体的水体，应属污染水体；而以河蚌等软体动物占优势的水体，应是轻度污染水体。

湖北省水生生物研究所（1960年）和北京市环境保护研究所（1974~1975年）的调查研究获得类似结果，说明颤蚓类是污染区的优势底栖动物，具有指示作用。

2. 摇蚊幼虫

摇蚊系双翅目昆虫，幼虫生活于水中，是水体中主要底栖动物之一。它们除了作为鱼类天然食饵外，近来还被用作污染指示生物，而具有一定的优越性。首先是摇蚊幼虫和颤蚓等一样，多数不能远距离移动，对污染等不利环境因素常常没有或很少有回避性。这一点优于能自由移动或回避的动物，如鱼类、两栖类、爬行类等。其次摇蚊幼虫的种类多（已知有3000多种），分布广。另外不同种类的个体生态差异显著（如有的耐污耐缺氧；有的不耐污不耐缺氧；有的耐氰、六价铬、铜等毒物污染）。这些都优于同为底栖生物的颤蚓类。

根据中国科学动物研究所等单位（1973~1974年）对官厅水库摇蚊幼虫的调查和青海省生物研究所（1974年）对湟水摇蚊幼虫的调查，认为它们可以作为水体污染的指示生物，而且认为摇蚊幼虫在促进水体中质能小循环，分解或矿化某些有机物，加速污水的自净中也有重要作用。大多数种类的摇蚊幼虫是专食或兼食有机碎屑和生活三废中有机物的。有人调查日本泽湖中摇蚊幼虫每年摄食的有机物达3.0~3.5公斤（干重/平方米）。总摄量占该湖年沉积物总量的30%左右，可见它们对水体的净化作用是很大的。对工业有机废物如酚、苯等是否也具有分解净化能力，尚待进一步研究。

3. 蚂蝗

蚂蝗也是一种相当耐污的无脊椎动物，在有机物污染的地方，有时数量可以达到惊人的地步。如1925年，美国伊利诺斯河

受有机物污染，每平方米蚂蝗数量多达29,107个，合每公顷2800公斤。这种动物对铅、铜和滴滴涕农药的忍耐力亦很强，有些可以把滴滴涕分解成无毒的代谢物DDE。

对于重金属和其它毒物则与有机污染物的性质不同，生物的反应也不一样。据国外资料，软体动物、某些扁形动物、鱼类、毛翅目昆虫都对重金属污染很敏感。但颤蚓对铜和铅的混合毒液有很高的忍耐力。甲壳类、石蝇、石蚕幼虫和蜉蝣对DDT等农药敏感。但蠕虫一般对农药有较高的耐性，特别寡毛类、蛭类对有机氯农药耐力很大。湖北省水生生物研究所对蚤类作为监测农药污染水体也进行了研究，认为隆线蚤对农药的敏感性大于白鲢。

(二) 生物指数法

污水生物系统注重单纯以某种生物评价污染，有时并不很可靠；而且需要熟练的分类知识，工作量大，又耗费时间；调查结果也不易表示。基于这种原因，有些生物学工作者建议致力于研究生物群落结构如何对水体污染作出反应，并提出以生物指数来表示污染情况。生物指数的应用近年来发展很快，各国已相继设计和广泛应用着种类繁多的生物指数，并取得了很多成果。据报导，在日本生物指数已作为切合实际的监测水质污染的方法，并广泛的应用着。

Beck (1955年) 首先提出一个简易的数量指标——“生物指数”，他将调查发现的底栖动物分成A和B两大类：A为敏感种类，在污染状况下从未发现；B为耐污种类，是在污染状况下才有的动物。然后以下式表示生物指数：

$$\text{生物指数 (BI)} = 2^n A + nB$$

式中： n ——是底栖大型无脊椎动物的种类数。

应用此法时，各站的环境因素如水深、流速、底质等要力求一致，采集的面积一定。

根据美国佛罗里达洲卫生局的经验，水体的生物指数值在清水区为10~40；在中等有机污染区为1~6；在重污染区为0。

津田松苗 (1974年) 曾对此法作了修改，即不限定采集面

积, 扩大采集规模, 把某河段各种大型底栖动物种类尽量采集全, 大约4~5人30分钟采完一个点。分类及计算方法同上。这个指数值与水质关系为:

$BI > 30$	干净河川
$29 \sim 15$	较干净河川
$14 \sim 6$	较不干净河川
$5 \sim 0$	极不干净河川

北京动物所通过对某河流生物指数的研究结果, 认为以上方法是否切实可行, 值得进一步探讨, 他们认为若以该河的材料来分析, 以大型无脊椎动物种类多样性指数来评价水体污染程度, 可能比较合理一些。

生物指数法比较简单明了, 有一个粗略的数字概念, 便于比较和应用。但必须具备分类学和生态学知识, 只考虑种类数, 不考虑个体数, 仍欠完整。

(三) 种类多样性指数法

在六十年代中研究最多的则是群落中种的多样性指数。其概念是: 水体某一营养级(亦称营养水平)或整个群落所包含的总种数中, 个体较多的常见种(亦称优势种)只占很少的百分比, 而绝大多数种类则是个体数(或生物量)不多的稀少种。恶劣环境, 如污染, 会使种的多样性减少。种的多样性指数, 反映了群落中的种数和个体之间的关系。被认为是侦察和评价污染程度的最好方法之一。

简言之, 所谓多样性指数就是群落中的个体数与种类数的比值。由于水体遭到污染后, 群落中的种类减少, 而某些抗性强的种类的个体数则增加, 因而不同污染区内上述比值就不同, 利用这种指数可以反映出污染的现状。

因此, 可以说这个方法的理论基础是由于污染会影响到底栖动物的种群结构, 其种类及数量会起变化, 它既注意到种类的多样性, 也注意了其相对数量。

Cairns等(1968年)提出一种不用专业分类人员, 能很快评

价水质的生物学方法，叫连续比较指数法。这个方法不需要分类检索，仅根据动物外表的颜色、大小、形态结构来确定动物之间的差异，再根据类别和密度两个参数估计生物的变化，以确定污染状况。野外调查方法和津田松苗修改的生物指数法近似。以下式表示：

$$\text{连续比较指数 (S.C.I)} = \frac{\text{组数}}{\text{标本个数}}$$

所谓“组”是指镜检时从左到右或从上到下循序将相邻的个体加以比较，形态相同的就列为一组。如果相同的个体为不相同的一个个体所间隔，那么这一个个体就单独成为一组。随后又遇到与第一组相同的个体时，又另列为一组。如此连续比较200个体，即可得出组数和算出S.C.I值来。但有人认为这种指数不能完全准确地反映污染程度。

近来发展了一些数学模式。例如Wilhelm (1970年)用一种混合种类及数量的公式表示大型无脊椎动物调查结果。公式如下：

$$\overline{d} = - \sum_1^s (n_i/n) \log_2 (n_i/n)$$

式中： \overline{d} ——多样性指数：

n ——样品中生物的总个体数；

n_i ——样品中每样动物的个体数；

s ——样品中动物的样数。

用上面模式计算了许多人的调查资料，发现 \overline{d} 值变动在0~任何正数。全部个体属一种者， $\overline{d} = 0$ ；全部个体各属不同种者， \overline{d} 值最大。未被污染或污染已恢复的河川， \overline{d} 值在3~4之间，受到污染河川， \overline{d} 值小于1。

不少人已将有机物污染的指示生物概念应用到评价重金属污染方面。

总之，许多学者提出了各式各样的多样性指数，在群落分析中运用数理统计方法，这是一个进步，但国外出现一种倾向，以

为只要通过统计分析就能准确判断群落结构，反映污染情况，因而推导的公式愈来愈复杂，运用很不方便。同时也不要局限于某类生物，而对环境的理化性质也必须注意。过分信赖任何单项参数，往往会导致对环境情况的严重误解。

二、水体污染的生理生化评价法

（一）生理生化检测指标法

为了寻找更灵敏的生物监测方法，近十多年来，生物学工作者进行了大量的研究工作，他们提出用鱼的行为、生理、生化特点以及存活情况作为监测水体污染的指标。因为受污染危害的鱼类在到达致死以前很久，其行为、生理、生化已有反应。

行动习性方面，主要研究鱼类对毒物的回避反应、活动型式、游泳能力等等。通常可看到鱼类在污染环境中的不安，到水面活动，浮头等。

生理活动方面，主要指污染物对鱼类呼吸（呼吸速度加快，鳃盖运动频率增加），心跳（受污染后心跳加快），耗氧量（增加），生长速度（减慢）等方面的研究。

生理生化反应方面，主要研究毒物对鱼类酶活性（鱼脑胆碱酯酶、转氨酶、糖酵介酶等）、肝细胞的糖原变化等研究。

用鱼类作为水体污染生物监测的项目有：

- （1）活动型式的变化，用于监测重金属。
- （2）游泳行为的变化，用于监测热污染。
- （3）呼吸频率和咳嗽频率的变化，用于监测重金属、农药、造纸废水。

（4）条件反射活动的变化，用于监测金属、农药等污染。

（5）鱼脑胆碱酯酶活性的变化，用于监测有机磷农药污染。

下边着重介绍鱼脑胆碱酯酶用作监测水体污染的一些研究情况。

Weiss (1958年) 提出用鱼脑胆碱酯酶活性的抑制来监测水体中有机磷农药污染的想法。后来他又研究了有机磷农药对鱼脑乙酰胆碱酯酶活性的抑制作用。Holland (1967年) 以鱼脑乙酰

胆硷酯酶活性为指标评价有机磷污染情况，发现受有机磷农药污染的地区，酶的活性较低。

我国湖北省水生生物研究所（1978年）的试验资料指出，鱼类胆硷酯酶的活力受鱼龄、种类、水温及不同水体生态条件变化等因素的影响不大，可以作为监测水体污染的工具。并认为这种酶特异地受有机磷农药及氨基甲酸酯类农药如西维因的抑制。因此认为这种酶活力可以作为监测水体污染后鱼体中毒的较好指标。他们还认为在实验室条件下，白鲢鱼的酶活力下降15%，即表明污染的存在，而天然水体鱼脑胆硷酯酶活力抑制30%以上才能确定有污染的存在。原因主要是个体差异所造成。

（二）动物体内毒物含量检测指标法

许多水生动物对重金属、有机农药和放射性物质具有很强的富集能力，其体内含量往往超过周围环境中相应含量几千倍至上万倍。运用先进的化学分析技术测定某类动物体内毒物含量，如发现超过正常含量范围，就可以判断水体污染的性质和程度。特别是环境中有时由于某种污染物含量太低时，用普通方法不易测出，而在生物体内由于富集的结果，浓度较大，普通方法就可以满足要求。总之用测定动物体内毒物含量来检测水体污染，是近年来比较兴旺的一个研究领域。

瑞典 Berg 等(1966年)用中子活化法分析博物馆保存的鸟类羽毛汞的含量，发现吃种子的鸟类羽毛汞含量的增加是与四十年代早期甲基汞杀菌剂处理种子相关联的。同时证明了1900年以后，吃鱼的鸟羽毛含汞量亦明显增加，与瑞典工业增长伴随而来的汞损失增加相并行。

Johnels (1967年)用中子活化法分析研究白斑狗鱼 (*Esox Lucius L.*) 及一些其它水生动物体内汞的含量及其与污染的关系，发现鱼体内汞含量与汞污染有着密切的关系。例如瑞典北部地区未受使用汞的影响，鱼汞含量为122微微克/克；中南部农业区，使用有机汞杀菌剂处理种子，鱼汞含量增加到200~300微微克/克；第三类是距工业污染源较远，但受到影响，也有农业上

的影响地方，鱼汞含量为250~1400微微克/克；第四类是直接受汞影响的地区，鱼汞含量最高，达到450~2500微微克/克。

蚌螺等软体动物能富集重金属和放射性物质，许多资料表明，无论海水或淡水贝类，都易富集重金属于软体部分及贝壳中。

Clarke等(1974年)提出一种蚌(*Corbicula manillensis*)是某时间间隔内水中低浓度铅的极好检测器。一些螺类对重金属、有机氯农药和放射性物质也有较强的积累能力。

湖北省水生生物研究所^[13]曾在YE湖的子湖——YJ湖调查中发现，底栖动物积累毒物残留量较高，如水丝蚓积累666残毒为25.385ppm，圆蚌为9.01ppm。底栖动物的生活周期较长，且能富集水中微量的有毒物质，其积累能力在较短时间内可达到水中浓度的数百倍至数千倍，因此可测定底栖动物的残毒来监测水体污染，而且选用寡毛类的霍甫水丝蚓(*Limnodrilus hoffmeisteri*)和软体动物的铜锈环梭螺(*Bellamya aeruginosa*)进行富集666的试验，所得结果如图2-4-1所示。

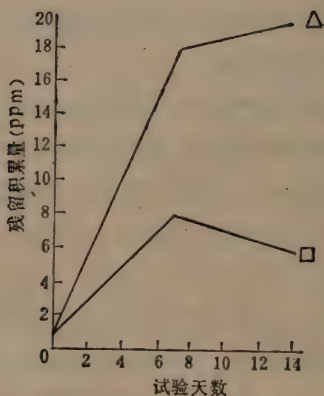


图 2-4-1 霍甫水丝蚓和铜锈环梭螺在试验溶液中对666的积累

△—霍甫水丝蚓；

□—铜锈环梭螺

(三) 鱼类毒性试验检测法

用鱼类的急性中毒或慢性中毒实验以确定工业废水的毒性及其安全浓度，是生物监测中常用的手段。这种方法可分为静置试验和恒流试验两种，前者是将毒物或废水配成各种浓度，放在玻璃缸中，然后放入数量、大小相近的鱼若干尾，定时观察记录存活尾数；后者是在特殊装置的流动水中进行。它还包括天然河流中进行的鱼类毒性试验。这方面资料甚多，仅提一点，Davis (1964年) 用一种比较小的食蚊鱼 (*Gambusia*) 作废水毒性现场试验。它把鱼放在尼龙网袋内，挂在现场实际的水中，观察鱼的行为反应，若在4~5天内有鱼死亡，说明水质受污染。在正常情况下，此鱼2~4周不吃食物可以存活。

关于进行鱼类毒性试验的方法，在第四篇研究方法中还要专门介绍。

三、水体污染的细菌学评价法

(一) 传染性肠道病原菌

水中含有的细菌大部分不是致病菌，其中只有几种引起肠道传染的病原菌。最常见的有伤寒、痢疾、霍乱等病原菌，它们主要是由粪便污水污染到水中，这些病原菌常常引起严重的后果。因此为了保障人民的卫生条件和身体健康，就必须进行水的细菌学检验。首先介绍这几种病原菌的基本特征及其危害。

1. 伤寒杆菌

伤寒杆菌包括伤寒沙门氏菌 (*Salmonella typhosa*)、副伤寒沙门氏菌 (*S. Paratyphi*) 和副伤寒沙门氏菌 (*S. Schottmulleri*)。

伤寒杆菌是一种常见的肠道病原细菌，菌体呈两端纯圆的小杆菌，平均大小为 $0.5 \sim 0.8 \times 1.5 \sim 3.0$ 微米，在显微镜下的形态与大肠杆菌一样，无荚膜，无芽孢，周生鞭毛，能运动，是好气性菌，革兰氏染色阴性。适温 $30 \sim 37^{\circ}\text{C}$ ，在 60°C 下30分钟即可被杀死。在培养基上形成湿润，柔软，透明而隆起的圆盘形菌落。这种菌可以引起伤寒和副伤寒传染性病。感染源多为带菌的粪便。

2. 痢疾杆菌

痢疾杆菌可以引起细菌性痢疾，主要有痢疾杆菌 (*Shigella dysenteriae*) 和副痢疾杆菌 (*Shigella parodysenteriae*)。痢疾杆菌形态和伤寒菌相似，菌体短小，长约1~3微米，不产生芽孢和荚膜，一般无鞭毛，不能运动，革兰氏阴性反应，属于好气性菌。生长适宜温度37°C，在60°C下10~30分钟即可杀死。培养特征与伤寒菌相似。

3. 霍乱弧菌

霍乱弧菌 (*Vibrio Comma*) 是霍乱病原菌。菌体弧状，长约2~3微米，能以端生鞭毛活泼的运动，革兰氏阴性反应。不产生荚膜和芽孢，是好气性菌。适宜生长温度37°C，喜碱性，最适pH8~8.5，在碱性培养基上形成浅蓝色、透明、柔软、稍隆起的圆形大菌落。在60°C下30分钟即可被杀死。

以上三种病原菌的形态见图2-4-2。

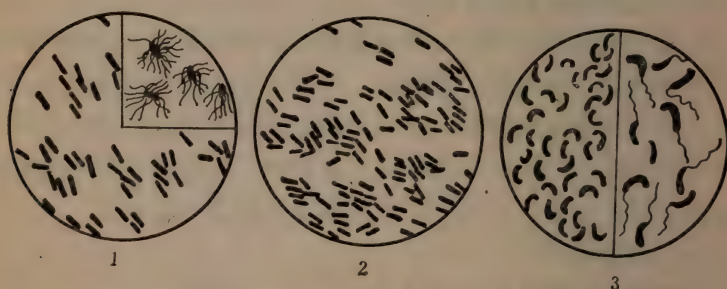


图 2-4-2 三种病原菌形态示意图

1—伤寒杆菌；2—痢疾杆菌；3—霍乱弧菌

经水传播的病原菌，除以上三种外，还有引起肝炎、脑膜炎等的病毒；也有一些肠道寄生虫，如蛔虫、姜片虫、血吸虫、绦虫等的虫卵，都可引起病害。因此在集中供水中，可通过投氯消毒，加强粪便管理，以防止寄生虫卵和病原微生物的传播。

(二) 大肠菌类的卫生指标意义

天然水的细菌性污染主要是由于粪便污水的排放而引起的。要判断水质是否安全可靠，适于饮用，最好是检查水中有无病原

菌。但由于被粪便污染的水中病原菌数量毕竟较少，而水中细菌种类繁多，要想排除一切细菌，单一检查出病原菌是比较困难的。所以一般情况下只测定水中有无肠道正常细菌的存在，就可以确定水是否受到粪便的污染，从而说明有被病原菌污染的可能性。只有在特殊情况下才需作病原菌的检查。

肠道正常细菌包括肠杆菌、肠球菌和产气荚膜杆菌三类。作为卫生指标的非传染性肠道细菌的指标，必须符合下列条件：

(1) 该种细菌在外界环境中生存的时间应与肠道病原细菌相似；(2) 该菌在肠道中的数量最多；(3) 检验方法简便易行。根据粪便中最多的是肠杆菌，肠球菌次之，产气荚膜杆菌最少，三种细菌检查都不困难。但产气荚膜杆菌具有芽孢，能长期在自然界中生存，故不能足以说明为新近粪便所污染；相反，肠球菌抵抗力弱，生存时间比病原菌短，所以水中没有检查出肠球菌，也不能保证未受粪便的污染。唯独肠杆菌数量多，在外界生存时间也和肠道病原菌接近，因此他作为水细菌学检验的指标是比较理想的。

普通大肠杆菌也称为大肠杆菌或大肠菌（图 2-4-3）。一般包括大肠埃希氏杆菌（*Escherichia Coli*）、产气杆菌（*Aerobacter aerogenes*）和副大肠杆菌（*Paracoli*）等。有的也将埃希氏杆菌称为大肠杆菌，它大量存在于人和温血动物肠道中，菌体长约2~3微米，宽0.5~0.8微米，能以周生鞭毛进行活泼的运动，生长适宜温度为37°C，最适pH值为中性。在培养过程中，不产生芽孢，革兰氏染色阴性，好气或嫌气性，能发酵葡萄糖和甘露醇等产酸产气；在这滕氏培养基上生长形成具有金属光泽的粉红色的菌落。这些都是大肠菌检验的重要特征。



图 2-4-3 大肠杆菌

水的细菌学清洁程度，是指一定体积水中大肠杆菌的数量，

计算大肠杆菌数量的指标有两个,即大肠杆菌指数和大肠杆菌值。

大肠杆菌值是指含有1个大肠杆菌的最少水量,以毫升表示,一般不提单位。如大肠杆菌值333,即每333毫升水中检出一个大肠杆菌。

大肠杆菌指数是指一升水中的大肠杆菌数,如大肠杆菌数为3,即每升水中有3个大肠杆菌。

根据生活饮水的有关规定,饮水细菌总数在 37°C 培养24小时,1毫升水中不超过100个,大肠杆菌指数为每升水中不超过3个。大肠杆菌值不低于300(毫升)。

(三) 水体污染的细菌学指标

作为水体污染监测的两项常用细菌指标是:

(1) 细菌总数:是1毫升水样在普通琼脂培养基中经过 37°C 培养24小时后所生长的细菌菌落总数。当水体被人畜粪便或其它有机物污染时,其细菌总数急剧增加,因而细菌总数可作为水体污染的标志。

(2) 大肠杆菌:许多国家规定,以大肠杆菌及其变种作为一项水污染指标,前面说过,从卫生观点看,大肠杆菌是人畜粪便污染的重要指标。关于水的卫生细菌学检查方法,在后边还要专门讨论。

综上所述,水体污染的生物学评价工作开始虽然较早,但进展缓慢,早期工作主要以有关指示生物对河流有机物污染进行定性评价,有一定的效果,但涉及种类广泛,鉴别困难,很费时间。近年来,多以大型无脊椎动物群落结构及其相对数量反映污染影响,并以数学公式表示污染程度。这种方法比较能反映实际情况,且报告简明,便于比较。但群落结构与动物本身很复杂,影响因素很多,数学公式还不能反映这种情况。所以目前仍需与理化资料相结合,否则很难正确评价水体污染程度。

许多水生动物对毒物有很强的富集能力,据以评价水体污染状况,是近年来重要研究课题。特别贝类,因其活动性小,生活史长,处于食物链中段,富集力强,因此研究的较多,认为是有

希望的指示生物之一。

有关指示生物的生理、生化研究得很不够，但这种方法可以认为是评价和监测水体污染的一种比较灵敏和有效的工具。

总之，为了适应环境保护工作的需要，还要不断努力以找出快速、有效的生物评价方法。

关于原生动物对于水体污染与净化的指示作用，已在第二章中讲过了。

四、植物在环境监测中的应用

用植物指示环境污染，尤其是指示大气污染的作用，早被人们发现。几十年来，国内外利用植物来监测环境污染的工作已做得比较多。如利用柳杉、红松、冷杉等植物的敏感性来综合指示城市环境污染的程度；用紫花苜蓿、胡萝卜、菠菜等监测大气的 SO_2 污染；用唐菖蒲、郁金香、杏监测氟污染；用矮天牛、烟草、美洲五针松监测光化学烟雾；用棉花监测乙烯；用向日葵监测氨；用柳树、女贞监测汞以及用复叶槭、落叶松、油松监测 Cl_2 和 HCl 等等。由于植物监测具有方法简单、使用方便、成本低廉等优点，并有利于开展群众报警工作，因此，正在受到有关方面的重视。

（一）什么叫环境污染指示植物

植物和周围环境有着密切的关系，一个典型的指示植物是一个单一的植物种类，通过它的有无，可以显示出一种环境因素的水平，这种植物称为指示植物。

环境被污染以后，污染物对植物的毒害会反映在植物体上来，植物的这种反应就叫做环境污染的“信号”，人们用这种“信号”来分析鉴别环境污染的状况。这种对环境污染敏感的植物称为“环境污染指示植物”，或“监测植物”、“污染警报植物”等等。

许多植物对环境污染的反应比人和动物敏感得多。如紫花苜蓿在空气中 SO_2 达到 0.3ppm 时就会出现症状，而人则要达到 $1\sim 5\text{ppm}$ 时才能闻到气味，当浓度达到 $10\sim 20\text{ppm}$ 时才咳嗽流泪。还有唐菖蒲，能忍受十亿分之一氟化物，而一般监测仪器尚达不

到这样灵敏的程度。另外如地衣，苔藓类低等植物比种子植物更敏感，它们生长于树干、岩石上，不受土壤因素的影响和干扰，监测效果也好。因此，可以利用植物的这些敏感性监测环境的污染。

指示植物发出的污染“信号”是什么？主要有以下几方面：

(1) 产生可见症状。当植物受到污染影响后，常常会在叶片出现肉眼看得见的伤斑，即可见症状。不同的污染物质和浓度所产生的症状及程度各不相同。

(2) 生理代谢活动发生变化。这主要是指污染物质对内部生理代谢活动发生的影响，例如使蒸腾率降低，呼吸作用加强，叶绿素含量减少，光合作用强度下降。进一步生长发育受到影响，生长量减少，植株矮化，叶面积变小，叶片早落和落花落果等。

(3) 植物成分异常变化。受污染后，由于植物吸收污染物质而使其中的某些成分含量发生变化。日本分析梨树叶片的結果，是受 SO_2 污染过的叶片含硫量比正常叶片几乎高1倍。南京植物所分析氟污染地区的大叶黄杨叶片，其含氟量比正常的约高4倍。

究竟采用那一种指标，应根据实际情况和工作条件来决定，尽可能地把各种“信号”加以综合分析，以便得出正确的结论。

(二) 环境污染指示植物的选择

指示植物监测环境污染的关键在于它对各种污染物质的敏感性，因此需要通过各种途径把敏感的植物选择出来。一般的选择方法是通过调查找出某一污染区最易受害，症状明显的敏感植物，然后在不同类型污染地区进行栽培试验，以及人工控制试验等。现将江苏省植物研究所根据试验提出的一些敏感植物列于表2-4-2，供作参考。

(三) 怎样用指示植物来监测环境污染

植物对大气污染的反应比较明显，当前国内外在这方面的试验研究和应用也比较多。

表 2-4-2 一些敏感植物种类

污 染 物 质	植 物 名 称
SO ₂	紫花苜蓿、向日葵、胡萝卜、莴苣、南瓜、芝麻、蓼、土荆芥、艾、紫苏、灰菜、落叶松、雪松、美洲五针松、马尾松、枫杨、加拿大白杨、杜仲、橡树
HF	唐菖蒲、郁金香、萱草、美洲五针松、欧洲赤松、雪松、兰叶云杉、樱桃、葡萄、黄杉、落叶松、杏、李、金荞麦、玉簪
Cl ₂ 、HCl	萝卜、复叶槭、落叶松、油松、桃、荞麦
NO ₂	悬铃木、向日葵、番茄、秋海棠、烟草
O ₃	烟草、矮牵牛、马唐、雀麦、花生、马铃薯、燕麦、洋葱、萝卜、女贞、银槭、梓树、桉木、皂荚、丁香、葡萄、木笔、牡丹
PAN	繁缕、早熟禾、矮牵牛
Hg	女贞、柳树

1. 根据植物可见症状判断环境污染状况

以下从环境监测角度，首先介绍几种主要大气污染物影响植物后出现的主要可见症状。

(1) 二氧化硫危害的叶部症状

阔叶植物叶缘和叶脉间出现不规则的坏死小斑，呈白色或淡黄色，周围组织通常为缺绿的花叶。如果长期暴露在低浓度环境中，则老叶表现为缺绿。

禾本科植物在中肋两侧出现不规则的坏死，由淡棕色到白色。针叶树在针叶顶端发生坏死，呈带状，相邻组织表现为缺绿。

(2) 臭氧危害的叶部症状

阔叶植物下表皮出现不规则的小点或小斑。小点变成红棕色，小斑退成白色。

禾本科植物最初坏死区不联结，随后可成较大的坏死区。

针叶树的叶顶部发生棕色枯尖，与二氧化硫伤害相似。

(3) PAN (过氧乙酰硝酸酯) 危害的叶部症状

阔叶植物, 如叶菜类产生下陷组织和棕色小斑, 而菸草、矮牵牛等组织下陷达整个叶片厚度, 多呈带状。

禾本科植物出现不规则的下陷带, 退成黄色和淡绿色。

针叶树没有特别的症状, 有的缺绿, 退色或枯萎。

(4) 氟化物危害的叶部症状

阔叶植物叶尖和叶缘坏死, 与活组织边缘界限明显, 通常为暗棕色的带。

禾本科植物出现棕色的坏死叶尖。

针叶树出现棕色到红棕色的坏死尖, 整个叶片都可坏死。

当然植物不同, 对污染环境的反应是不同的, 出现的症状也不一样。因此可以根据植物出现的症状来评价环境的质量和区划污染的范围。

目前根据植物可见症状监测大气环境污染的方法有以下几种。

(1) 利用植物“站岗、放哨”来监测大气污染状况。如在工厂周围种植各种敏感性不同的植物, 既美化了环境, 又监测了环境污染。以雪松为例, 一旦春季针叶发黄, 枯焦, 则其周围常常可找到排放的氟化氢或二氧化硫。群众称“雪松是一个很好的大气污染报警器”。其他如唐菖蒲、紫花苜蓿等均有这种作用, 因此称之为“生物监测器”。

(2) 利用植物群落估测大气污染程度

植物群落和它周围环境有着密切的联系, 环境条件的变化可以直接间接地影响植物群落的变化。在大气受污染的情况下, 植物群落中各种植物由于它们对污染物质敏感性的差异, 其反应有着明显的不同。因此分析植物群落中各种植物的反应 (主要是受害的症状及程度), 可以估测该地区的大气污染程度。

例如对某一化工厂附近植物群落进行调查, 群落中各种植物的受害情况如表2-4-3。

根据植物叶片出现的症状特点 (伤斑出现于叶脉间), 表明该

厂附近已被SO₂污染。从受害程度来看，特别是一些对SO₂抗性强的如构树，马齿苋等受到损害，可以判断该地区发生过明显的急性危害，估测其SO₂浓度可能在3~10ppm的范围。

(3) 利用指示植物定点监测报警

这是先在没有大气污染地区培植（一般盆栽）好监测植物，生长一段后，把它移到需要监测的地区，安放在不同地点，观察记载它们受害症状和程度，以此来估测该地区空气污染状况。例如唐菖蒲，它对氟化物反应特别敏感，有关单位用它来监测磷肥厂周围大气的氟污染，取得了较好效果，几天后唐菖蒲出现了典型的HF危害症状，叶片先端和边缘产生淡棕黄色片状伤斑。一周后所有监测唐菖蒲都出现了不同的症状，这表明该厂周围已被氟化物污染，而且污染范围至少达1150米。

表 2-4-3 某化工厂30~50米范围内植物受害情况

植 物 名 称	受 害 情 况
悬铃木、加拿大白杨	80%或全部叶片受害，甚至脱落
桧柏、丝瓜	叶片有明显大块伤斑，部分植物枯死
向日葵、葱、玉米、菊花、牵牛花	50%左右叶面积受害，叶片脉间有点块状伤斑
月季、蔷薇、枸杞、香椿、乌桕	30%左右叶面积受害，叶片脉间有轻度点、块伤斑
葡萄、金银花、枸杞、马齿苋	10%左右叶面积受害，叶片有轻度点状伤斑
广玉兰、大叶黄杨、腊梅	无明显症状

2. 利用地衣监测大气污染

地衣是藻菌共生体，最能耐受恶劣的环境条件，但对大气污染很敏感，甚至空气中极少量的有毒物质就可影响它的生长以致死亡。因它是一种良好的大气污染生物监测器，近一、二十年已开始实际应用，取得了较好效果。如果发现种类、数量、覆盖度

明显减少，就说明污染严重。目前应用地衣监测的方法主要有两种：一种是调查污染区的地衣种类、数量和分布；另一种是选择一种生长在树干上比较敏感的地衣（一般以叶状地衣为好）把它和树皮一起切下来，移植到需要监测地区的同种植物上，定期观察它们受害程度和死亡率，则可估测该地区大气污染的影响。

地衣不仅能监测大气中的 SO_2 ，而且也能监测 HF、HCl 等有毒气体。

地衣反应敏感，但它的分类比较困难，这也是地衣用作监测的一个缺点。

3. 根据植物叶片毒物成分含量估测环境污染

由于叶子是大气污染物的主要吸收器官，因此测定叶片污物含量，可以说明一定地区各点的污染情况。例如有人测定不同污染源距离的唐菖蒲和大叶黄杨的含氟量，从而估测出不同距离处的污染程度。

另外，有的通过对树木年轮的分析，来反映若干年的污染历史状况。一般受污染的树木年轮变窄。

总之，植物监测可以反应环境污染的总体水平，是环境质量评价的一个不可缺少的环节。由于利用植物监测环境污染还是一项新的工作，加上受环境条件和植物本身的影响，所以监测时要对结果认真进行分析，以得出正确的结论。

第三篇 环境治理中的生物学机理问题

生物处理法 主要是用来去除废水中溶解的和胶体的有机污染物质。城市污水主要由生活污水、粪便污水和生产废水组成。随着工业的不断发展,污水的组成成分也发生了很大变化。但就生活污水来讲,有机物主要是碳水化合物、脂肪和蛋白质。这些物质在生物体内的代谢过程,就是生化法处理污物的本质。

新陈代谢是生物最基本的特征之一,它包括生物体内所引起的一切分解与合成作用。这里所说的分解是指生物体内的复杂物质分解为简单物质的过程。因此,这个过程被称为分解代谢、也叫做异化。这是代谢的一个方面。而所谓的再合成,就是指复杂物质分解时生成的中间产物合成细胞结构或贮藏物的过程,称之为合成代谢(或组成代谢),也叫做同化。这是代谢的另一方面。

新陈代谢包括了物质代谢和能量代谢,二者常常偶联发生。进入生物体内的污染物质大体上经历了一般的生物化学转化过程。

第一章 碳水化合物的转化

一、多糖的水解

污水中可溶性有机物质可以直接透过细胞壁进入微生物体内,而一些大分子的有机物质则由胞外酶水解成较小分子的化合物,然后被生物加以利用。

糖类是微生物的基本营养和能源物质,多糖须经转化为单糖以后才能被吸收。

(一) 淀粉的水解

在自然界中,微生物通过本身产生的淀粉酶使淀粉水解、微生物的淀粉酶有四种:

1. α -淀粉酶

此酶又称液化酶或生糊精淀粉酶。它能水解淀粉分子中的 α -1,4糖苷键,而对枝链淀粉分支处的 α -1,6糖苷键没有作用,但可超越 α -1,6糖苷键使淀粉继续水解。在 α -淀粉酶的作用下,直链淀粉被水解生成含有葡萄糖分子的单位。而枝链淀粉在此酶催化下,形成两种水解产物,一种是含葡萄糖分子的单位,另一种是带短链的分枝物,这些产物统称为糊精,或称为极限糊精。

2. β -淀粉酶

此酶又称糖化酶或生糖淀粉酶，它催化直链淀粉水解成麦芽糖。这种淀粉酶对枝链淀粉的1·6糖苷键无作用，也不能超越此键进行分子内部水解。到分枝点处便停止下来。因此在 β -淀粉酶的作用下，枝链淀粉水解产物是麦芽糖和高分子糊精，或叫 β -极限糊精。

3. 葡萄糖淀粉酶

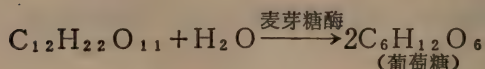
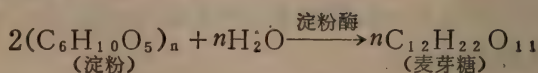
它每次可以水解出一个葡萄糖分子，不能水解枝链淀粉分支点的 α -1,6糖苷键。

4. 异淀粉酶

这种酶能水解 α -1,6糖苷键。

在上述四种酶的作用下，淀粉可以完全水解成麦芽糖和葡萄糖。麦芽糖在麦芽糖酶的作用下，继续水解成葡萄糖。即使单靠 α 和 β -淀粉酶的联合作用，也能将95%的淀粉水解成麦芽糖和少量的葡萄糖。

化学反应如下:



(二) 纤维素的水解

纤维素和淀粉一样，也是由葡萄糖单位缩合成的高分子化合物，但它们的结构很不相同，主要是淀粉以 α -1,4糖苷键联结，而纤维素则以 β -1,4糖苷键联结，这样就导致二者性质上的极大

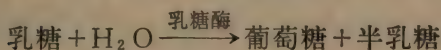
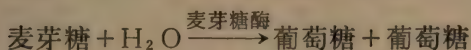
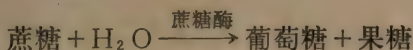
差异。

纤维素的水解过程为：



(三) 双糖的水解

水解双糖的酶多半是胞外酶（蔗糖酶既见于胞内，也见于胞外）。几种主要双糖的水解如下：



其中蔗糖和麦芽糖除了可以进行水解外，还可以进行磷酸化作用，生成物为1-磷酸葡萄糖和磷酸果糖，这种酶称为相应的磷酸化酶。这种磷酸化作用是细胞内利用多糖的主要形式。

微生物水解糖类的产物很多，其中以葡萄糖最为主要，它在各种微生物细胞内的水解，主要是通过生物氧化来实现的，途径是多样的。但总的来说，葡萄糖的分解有两种方式，即无氧分解和有氧氧化。在生理学和生物化学中葡萄糖的无氧分解被称为“发酵”或“酵解”，而有氧氧化叫做“呼吸”作用。目前发酵工业上所说的“发酵”是指通过培养微生物来获得某种产品的过程，把这一过程的需氧和不需氧统称为“发酵”。在污水处理中的厌气消化，就是生物学上的无氧分解。

二、葡萄糖的无氧分解—糖酵解

在无氧情况下，葡萄糖在微生物体内的转化过程主要是EMP途径。

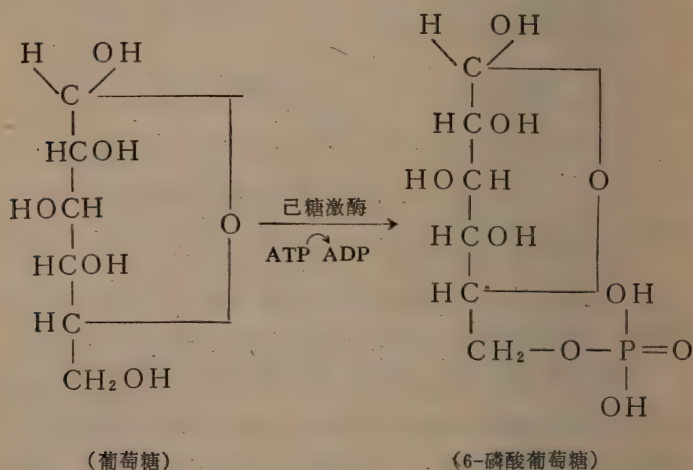
EMP途径，就是Embden-Meyerhof图式，常称之为“糖酵解作用”简称EMP途径。由于在这个分解过程中有二磷酸己糖的生成，而且又是个转折点，所以也叫做磷酸己糖途径。

葡萄糖的无氧分解是由一系列氧化还原反应完成的，相当复杂，为了便于理解，把从葡萄糖到丙酮酸的无氧分解过程分成三

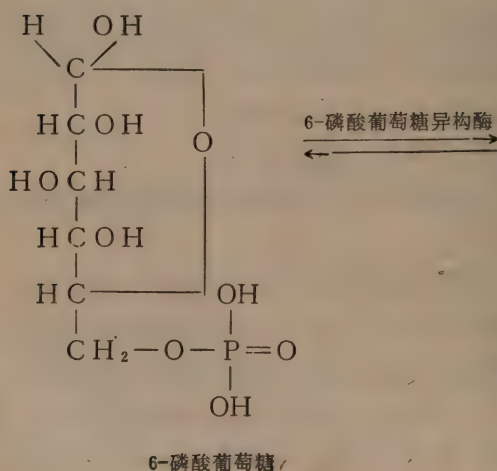
个阶段来叙述。

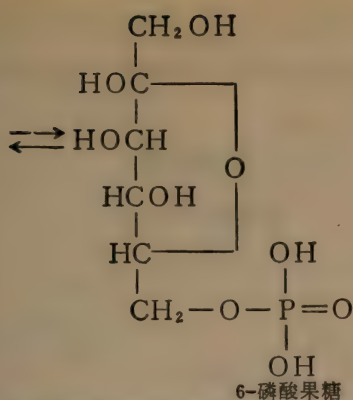
第一阶段：葡萄糖经过两次磷酸化作用，形成1,6-二磷酸果糖，其中要经过三个反应：

(1) 葡萄糖在腺三磷和己糖激酶作用下，形成6-磷酸葡萄糖。

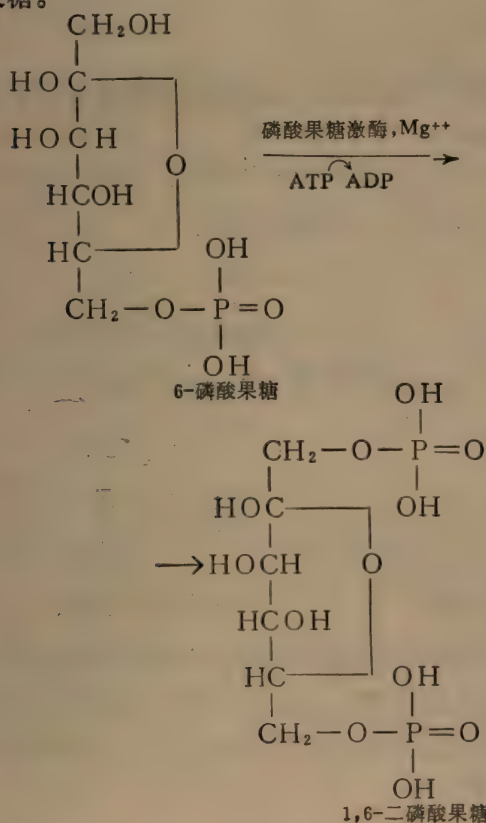


(2) 6-磷酸葡萄糖在异构酶作用下，形成6-磷酸果糖。

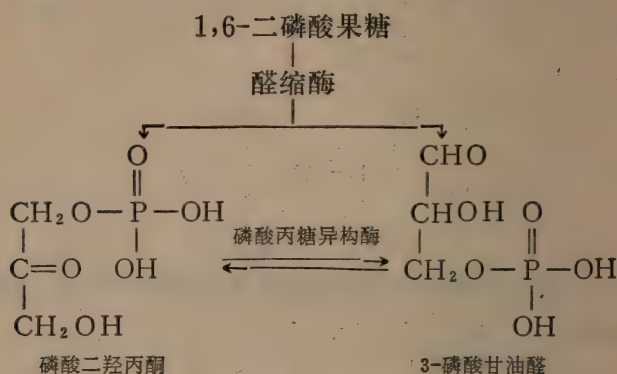




(3) 6-磷酸果糖在腺三磷和磷酸果糖激酶作用下, 形成1,6-二磷酸果糖。

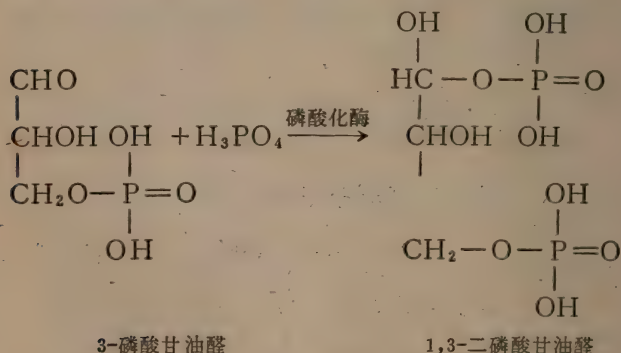


第二阶段：1,6-二磷酸果糖在醛缩酶作用下，分解成两分子磷酸丙糖：3-磷酸甘油醛和磷酸二羟丙酮。这两种产物又可互相转化平衡。

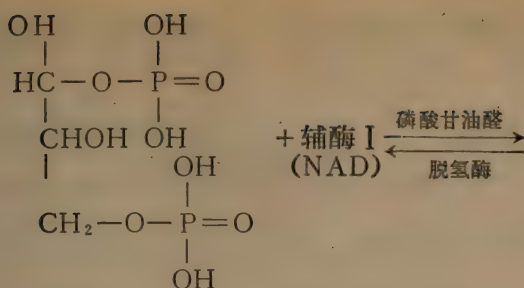


第三阶段：3-磷酸甘油醛进一步磷酸化和脱氢氧化等七个反应，最后形成丙酮酸。

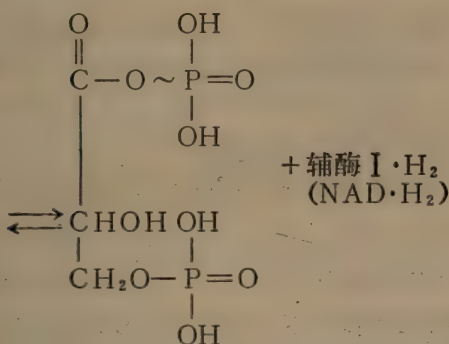
(1) 3-磷酸甘油醛在磷酸化酶作用下，从培养液中吸取一个无机磷酸分子，形成1,3-二磷酸甘油醛。



(2) 1,3-二磷酸甘油醛在脱氢酶（它的辅酶为辅酶 I，即 NAD）作用下，发生脱氢氧化、把1,3-二磷酸甘油醛氧化成1,3-二磷酸甘油酸。在脱氢过程中把分子中能量进一步集中到磷酸键中，形成高能磷酸键。

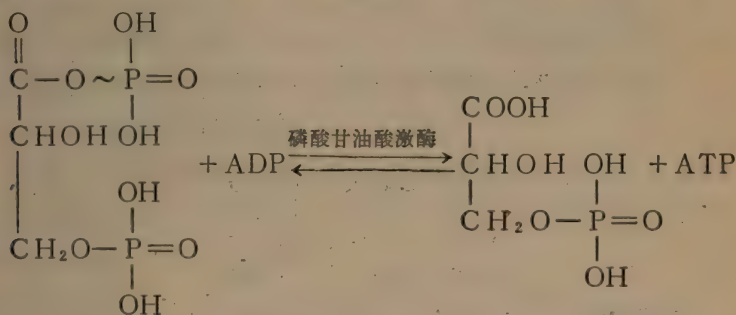


1,3-二磷酸甘油醛



1,3-二磷酸甘油酸

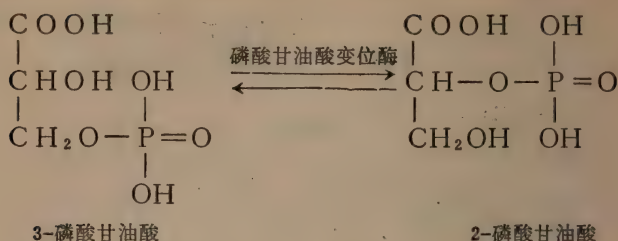
(3)在磷酸甘油酸激酶作用下, 1,3-二磷酸甘油酸中的高能磷酸键和磷酸转移给腺二磷, 形成腺三磷。



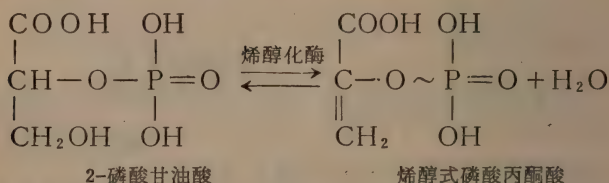
1,3-二磷酸甘油酸

3-磷酸甘油酸

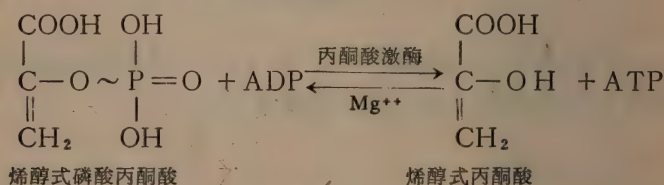
(4) 在磷酸变位酶作用下, 3-磷酸甘油酸转变成2-磷酸甘油酸。



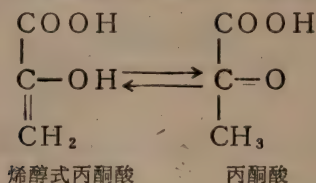
(5) 在烯醇化酶作用下, 2-磷酸甘油酸脱水, 形成烯醇式磷酸丙酮酸。在脱水过程中形成高能磷酸键。



(6) 在丙酮酸激酶作用下, 烯醇式磷酸丙酮酸的高能磷酸键和磷酸转移给腺二磷, 形成腺三磷。



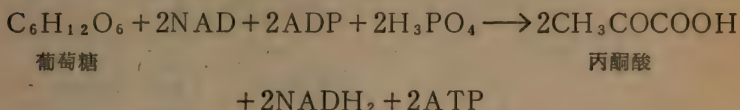
(7) 烯醇式丙酮酸很不稳定、自发地转变成丙酮酸。



葡萄糖经过EMP途径 (糖酵解) 被降解转化为丙酮酸的连续反应概括如下:

葡萄糖 → 二磷酸果糖 → 2磷酸三碳糖 → 2磷酸甘油酸
→ 2 丙酮酸

葡萄糖转变为丙酮酸的总反应式：



总结上述结果，可以看出以下几点：

(1) 从葡萄糖到生成丙糖以前，均属己糖与磷酸产生的各种磷酸脂的变化；

(2) 从磷酸甘油醛以后到生成丙酮酸为止，属丙糖及其衍生物的变化，也是包括各种丙糖磷酸脂的变化；

(3) 整个过程中，一分子葡萄糖被分解成两个分子的丙酮酸和 4 个氢，氢暂时由 NAD 携带，以后参加作用。在这一过程中净得两个高能磷酸键 (ATP)。

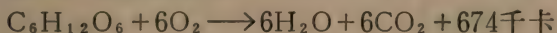
(4) 这一反应过程没有分子氧参与，因此称为糖酵解反应。

当然，除了 EMP 途径之外，还有其它支路（如戊糖支路，简称 HMP）。

在无氧条件下，丙酮酸可有各种代谢途径。厌气性微生物可以把丙酮酸进一步转化成乙醇、有机酸、丁醇、丙酮等中间产物，获得不同的产品。图 3-1-1 表示丙酮酸在无氧条件下的进一步转化途径和中间产物。这个过程实际上就是污泥消化的“不产甲烷阶段”或“产酸阶段”的基本生物化学原理。

三、葡萄糖的有氧氧化

己糖（主要是葡萄糖）的有氧分解过程，在生物学或生物化学上，常称之为“呼吸作用”，糖的这种有氧分解的最终产物是水和二氧化碳。总反应式为：



葡萄糖的有氧分解和无氧分解相比较，二者有一个共同的基础，这就是都以 EMP 途径为基础，是它们必经之路。不同之处主

丙酮酸氧化脱羧产生的乙酰辅酶A，可以进一步通过三羧酸循环氧化成二氧化碳和水，并释放出大量能量。这个循环包括了一系列的酶促反应，其主要反应过程如图3-1-2所示。

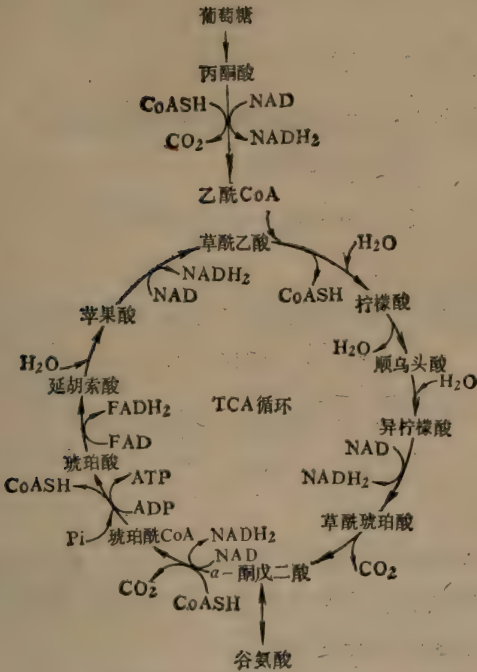
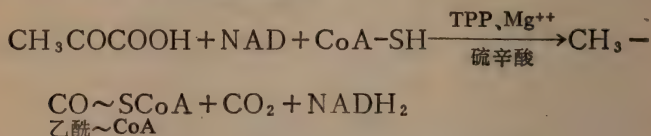


图 3-1-2 三羧酸循环图解

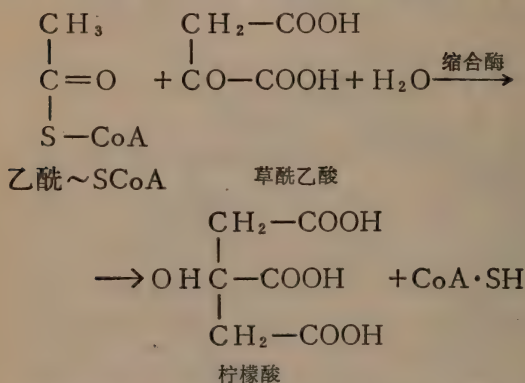
整个三羧酸循环是从乙酰辅酶A与草酰乙酸缩合成柠檬酸开始，经过顺乌头酸、异柠檬酸、草酰琥珀酸、α-酮戊二酸、琥珀酰辅酶A、琥珀酸、延胡索酸、苹果酸，直至最后又形成草酰乙酸等一系列氧化脱羧反应，草酰乙酸再与乙酰辅酶A结合重新进行循环。在循环中脱出的氢还原辅酶 I (NAD)或辅酶 II (NADP) 以及辅基黄素蛋白 (FAD或FMN)。通过循环、乙酰辅酶A的酰基氧化成CO₂。氧化碳原子的氧是由中间产物和水供给的。这一循环过程主要由下列反应完成。

(1) 乙酰~SCoA的形成。

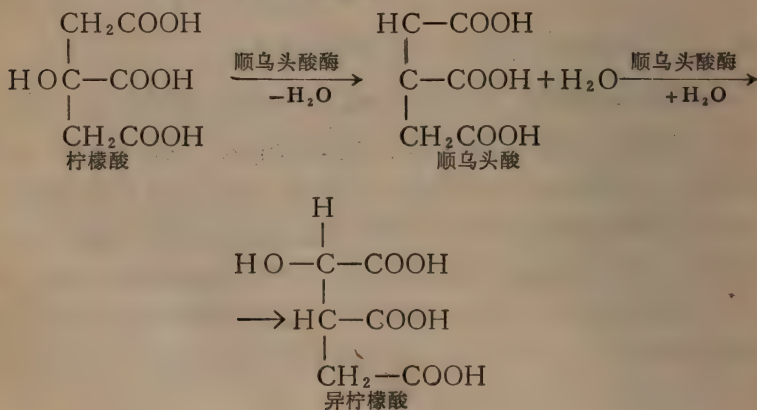
丙酮酸进入三羧酸循环以前，首先形成乙酰辅酶A，其中由几个反应完成，最后的总反应为：



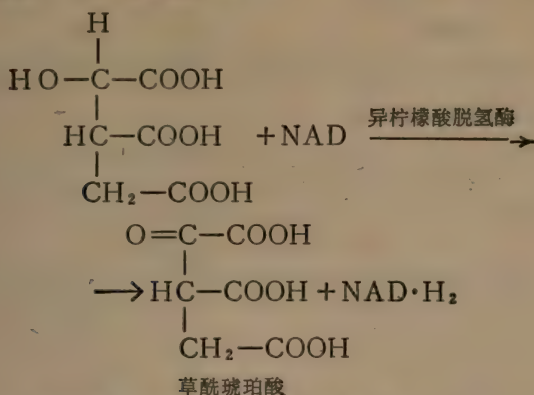
(2) 乙酰~CoA和草酰乙酸缩合成柠檬酸。



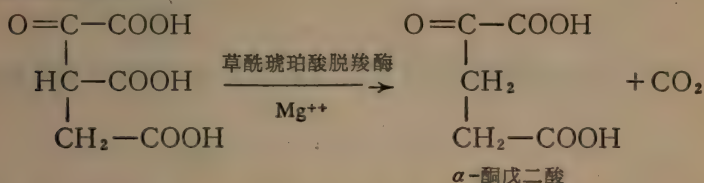
(3) 柠檬酸经顺乌头酸转变为异柠檬酸，此反应由顺乌头酸酶催化，先使柠檬酸变为顺乌头酸，失去一分子水，再由同一酶作用，加一分子水变为异柠檬酸。



(4) 异柠檬酸氧化生成草酰琥珀酸。催化此反应的是异柠檬酸脱氢酶，它的辅酶是NAD。

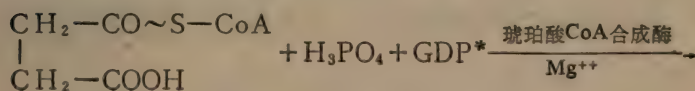
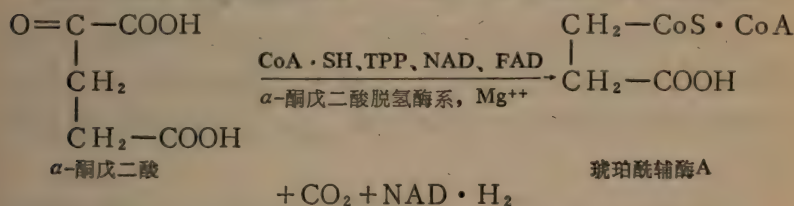


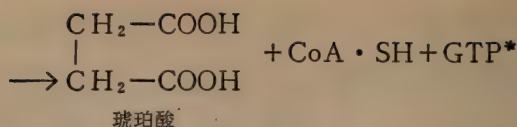
(5) 草酰琥珀酸脱羧生成 α -酮戊二酸。此反应由草酰琥珀酸脱羧酶催化。



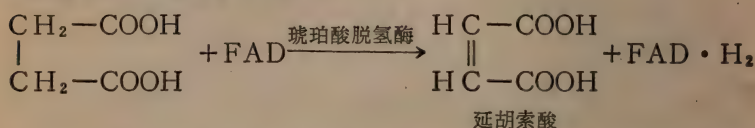
异柠檬酸也可以直接氧化脱羧生成 α -酮戊二酸、而不经草酰琥珀酸。如为此反应时，则以NAD为辅酶作为氢的受体。

(6) α -酮戊二酸氧化脱羧生成琥珀酸。这一步反应先由 α -酮戊二酸形成琥珀酰辅酶A，然后再形成琥珀酸。反应式为：

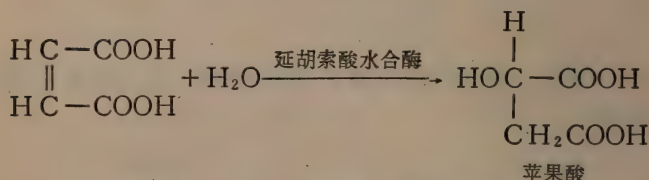




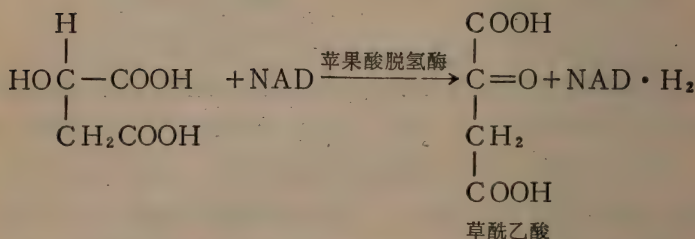
(7) 琥珀酸氧化为延胡索酸，此反应由琥珀酸脱氢酶催化脱氢。酶的辅基为FAD。



(8) 延胡索酸与水缩合生成苹果酸，反应由延胡索酸酶催化。



(9) 苹果酸脱氢变为草酰乙酸。反应由苹果酸脱氢酶催化。



由于这个过程由几种三羧酸循环反应来完成，故称作“三羧酸循环”。简称“TCA循环”。也有叫“Krebs循环”。又因这个循环是从柠檬酸出发又回到柠檬酸，所以又称为“柠檬酸循环”。

由上述反应可以看出，在好氧性微生物呼吸时，从糖形成丙酮酸，从丙酮酸形成乙酰辅酶A，以及整个三羧酸循环过程中不

* GDP—乌二磷，GTP—乌三磷，其能量和ATP相当。

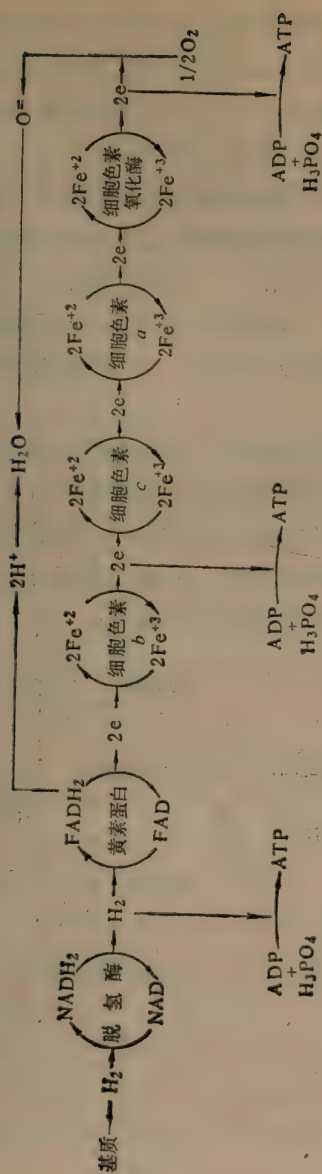


图 3-1-3 呼吸电子传递系统示意图

断发生脱氢氧化，脱下的氢对辅酶 I 和辅基黄素蛋白进行了还原。然后还原型辅酶 I 和辅基黄素蛋白脱氢氧化时，放出的电子是通过电子传递系统完成的。被脱下的氢最后与分子氧结合成水，在这一过程中还形成了三个 ATP。辅酶脱氢氧化的电子传递过程可用下列偶联反应（图3-1-3）来表示。

四、糖的有氧氧化与无氧分解之间的联系和生理意义

糖的分解代谢虽然有不同的途径，但是有些中间产物却是相同的。因此可以把EMP途径、TCA循环和HMP途径看成是一个整体。其中EMP途径和HMP途径的连接点是6-磷酸葡萄糖。EMP途径和TCA循环的连接点是丙酮酸。三者的相互联系可用图3-1-4表示。

糖的合成途径也是多方面的，如自养性生物通过光合作用形成糖类物质；动物及异养性生物通过己糖激酶将葡萄糖转化为6-磷酸葡萄糖，再经一系列转化合成多糖；一些非糖类物质也可经糖的异生作用形成葡萄糖或多糖。因此，在正常的生物体内，物质分解与合成总是在有条不紊地进行着。

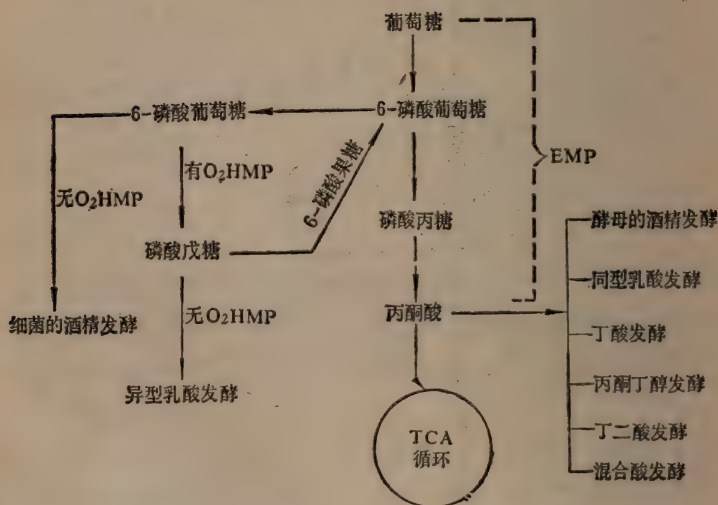


图 3-1-4 EMP、HMP和TCA的相互关系

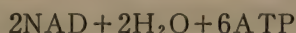
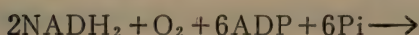
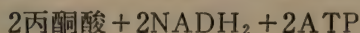
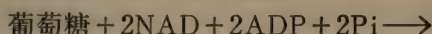
糖的分解代谢具有重要的生理意义，主要包括以下两方面。

1. 为生命活动提供了能量

一切生命活动都要消耗能量，糖的各种降解途径就是释放化学能量的过程，这是化能异养型生物获取能量的主要方式。

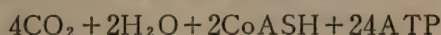
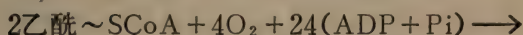
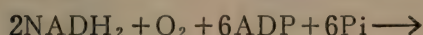
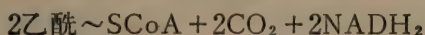
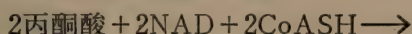
在好氧性微生物的呼吸过程中，一分子葡萄糖，通过糖酵解和三羧酸循环，完全氧化成 CO_2 和水，释放出能量，可以形成38个高能磷酸键的ATP，这些能量约占葡萄糖能量的50%左右。各种途径的ATP产量如下：

(1) EMP途径中ATP的产量：

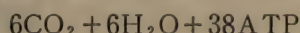
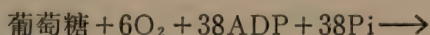


(无 O_2 条件下，没有这一步)

(2) TCA循环中ATP的产量：



总反应式可写成：



上述情况表明，TCA循环是提供能量的最有效的途径。EMP途径所提供的能量虽比TCA循环少的多，但它却保证了生物在缺氧条件下也能得到一定的能量供应。

2. 为细胞内有机物质的合成提供了原料

在生物体内，旧的物质不断被分解，而新的细胞不断的产生，这就要求组成新细胞的物质随时增加。这些物质有很大程度

上来自糖的分解代谢。各种代谢途径都有一系列的中间产物，其中有的是细胞内有机物质合成的必需原料，这一点在EMP、TCA过程中均有实例可见。

第二章 脂肪和蛋白质的转化

一、脂肪的分解

(一) 脂肪的水解

脂肪也称甘油三脂，它既是生命活动的能源物质，也是细胞内有机物质合成的碳源之一。

脂肪在生物体内不断地进行合成与分解。在合成方面，首先合成脂肪酸和甘油，然后在酶的催化下合成脂肪。在分解方面，首先是脂肪分解为甘油和脂肪酸。甘油基本上照糖代谢途径进行分解氧化，而脂肪酸则经 β -氧化成乙酰CoA，进入三羧酸循环完成氧化，并产生能量。脂肪的代谢概况如图3-2-1所示。

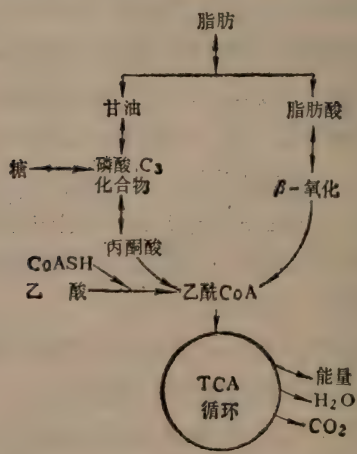
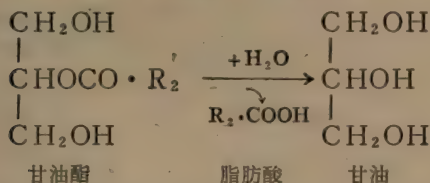
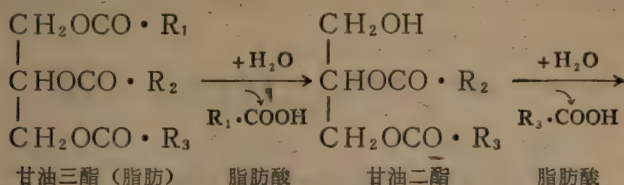


图 3-2-1 脂肪代谢主要途径示意图

在废水生化处理中，我们着重介绍脂肪的分解代谢。和其他生物一样，微生物（如荧光杆菌、绿浓杆菌、灵杆菌和某些放线菌与霉菌）也具有分解脂肪的能力。它们对污水中的脂肪类物质

的利用，是通过脂肪酶的催化作用，先水解成甘油和脂肪酸。

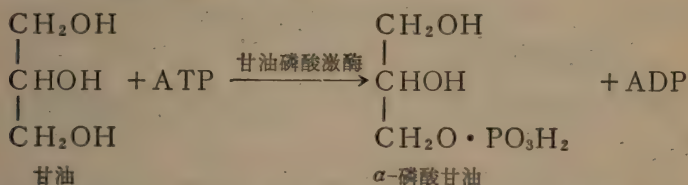


(二) 甘油和脂肪酸在细胞内的氧化

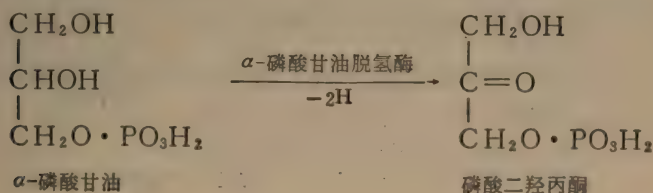
当脂肪被脂肪酶水解为甘油和脂肪酸以后，这些物质便进入细胞内继续进行氧化。甘油照糖代谢途径进行，脂肪酸则照 β -氧化过程分解。

1. 甘油的氧化

甘油进入细胞以后，在ATP的参与下、经甘油磷酸激酶的催化作用，形成 α -磷酸甘油。



α -磷酸甘油再经 α -磷酸甘油脱氢酶的催化，脱氢产生磷酸二羟丙酮。



然后，磷酸二羟丙酮主要通过 EMP 途径的后半部生成丙酮酸，最终经 TCA 循环被氧化成 CO_2 和水，生物体从中获得能量。在微生物内，也可以进入 HMP 途径。

甘油的转化过程，可用图 3-2-2 来表示。

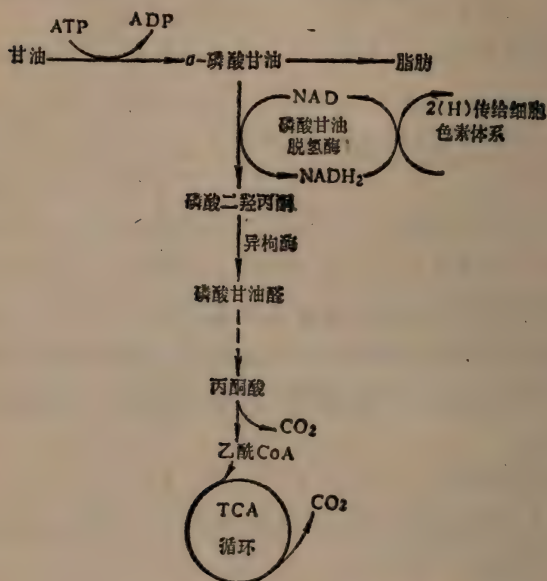


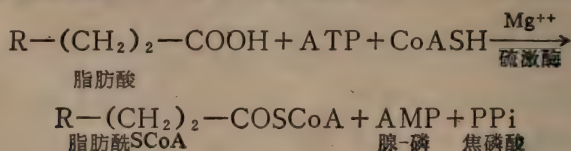
图 3-2-2 甘油的氧化途径

2. 脂肪酸的氧化

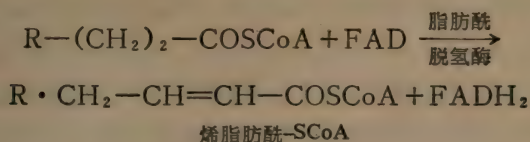
脂肪酸的氧化需要经过活化、 β -氧化及三羧酸循环等三个阶段。

根据近代研究结果，认为脂肪酸的氧化主要包括以下五个中间反应步骤：

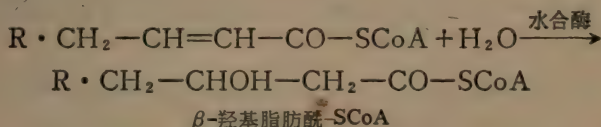
(1) 脂肪酸的活化。即在 ATP、CoASH 参与下，脂肪酸经脂肪酰硫激酶催化，而首先形成脂肪酰-SCoA。反应式为：



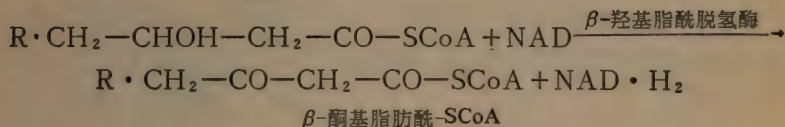
(2) 被激活的脂肪酰-SCoA 经 脂肪酰脱氢酶催化, 在 α 和 β 碳原子上脱氢而生成烯脂肪酰-SCoA。此脱氢酶是一种黄素蛋白, 其辅基为 FAD。



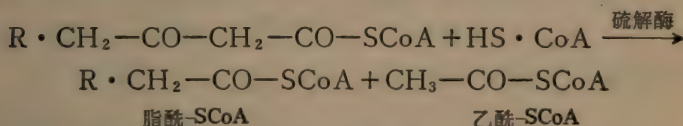
(3) 在水合酶催化下, 烯脂肪酰-SCoA 与水化合, 生成 β -羟基脂肪酰-CoA。



(4) β -羟基脂肪酰-SCoA 经其脱氢酶的催化, 生成 β -酮基脂肪酰-SCoA, 此反应以 NAD 为辅酶。



(5) β -酮基脂肪酰-SCoA 与 SHCoA 作用, 经硫解酶催化, 生成一分子乙酰-SCoA 和少了二个碳的脂肪酰-SCoA。



这里新生成的乙酰-SCoA 主要进入三羧酸循环而被彻底氧化为 CO_2 和 H_2O 。所生成的脂肪酰~SCoA 再由第二步反应开始, 重新进行 β -氧化, 同样进行一次可以脱掉两个碳原子, 直至脂肪酸完全氧化为二碳化合物 (即乙酰~SCoA) 为止。所以脂肪酸的 β -氧化是一个螺旋式的代谢过程。整个过程以图 3-2-3 表示。

脂肪酸是一种富有能量的化合物，经生物体内氧化降解过程释放出大量能量。脂肪酸每经过一次 β -氧化循环，可以产生5个ATP（一个 $\text{NAD} \cdot 2\text{H}$ 经呼吸链生成3个ATP，一个 $\text{FAD} \cdot 2\text{H}$ 经呼吸链产生2个ATP，每一次 β -氧化产生 $\text{NAD} \cdot 2\text{H}$ 和 $\text{FAD} \cdot 2\text{H}$ 各一个）和一个乙酰 $\sim\text{SCoA}$ （一个乙酰 $\sim\text{SCoA}$ 经TCA循环和呼吸链可产生12个ATP）。如果一个十六碳的饱和脂肪酸（即软脂酸）经 β -氧化彻底降解需经七次 β 氧化，并产生8个乙酰 $\sim\text{SCoA}$ ，结果共产生131个ATP $[(5 \times 7) + (8 \times 12) = 131]$ 。但在脂肪酸进行 β -氧化的第一步反应中消耗了一个ATP，所以实际上净得130个ATP。由此可见，脂肪酸所提供的能量远比葡萄糖多得多。

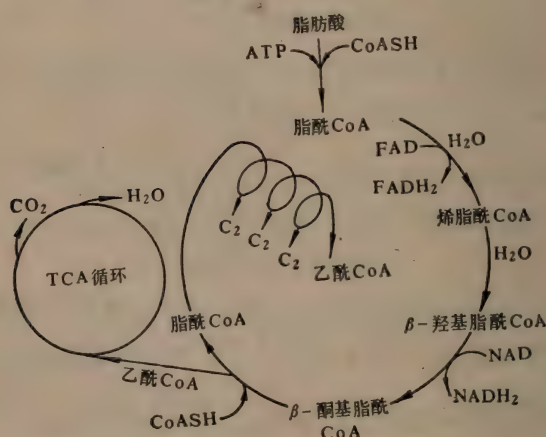


图 3-2-3 脂肪酸的 β -氧化循环图

二、蛋白质的转化

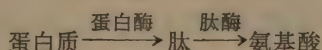
(一) 蛋白质的水解

蛋白质是由氨基酸组成的一种高分子有机化合物。在进行分解代谢时，先将蛋白质分解为氨基酸，进一步脱出氨基，产生酮酸，参加到糖和脂肪代谢中去。

蛋白质是在蛋白酶的作用下，各种蛋白质都可以被水解，产生较短的肽链或氨基酸。蛋白酶分为两种类型，即内肽酶和外肽酶。前者又称蛋白酶，主要作用于蛋白质内部的肽链，将蛋白质水解为长短不同的许多肽。这些肽再经外肽酶的作用，将一端的氨基酸一个个脱下来。

生物细胞内形成的蛋白酶可以透过细胞膜到外边去，催化胞外蛋白质的分解。微生物利用培养基中的蛋白质就是以此种方式进行的。

蛋白质水解的一般反应方式是：



只有当蛋白质被水解为氨基酸以后，才能透入细胞内，作进一步转化，有的转化合成菌体蛋白质，有的转变为另一种氨基酸，或者进行脱氨基作用。

(二) 氨基酸的分解

氨基酸的一般代谢过程，主要包括脱氨基作用和脱羧基作用，这是氨基酸进行分解代谢和转变成其他物质的重要途径，也是氨基酸的共同代谢通路。

1. 脱氨基作用

许多氨基酸进行分解代谢的第一步是进行脱氨基作用，将氨基酸的 α -氨基脱去，形成氨和 α -酮酸，这一过程也叫氨化作用。脱氨基作用有下列两种方式：

(1) 转氨作用，是一分子氨基酸与一分子 α -酮酸进行氨基移换的过程，是转氨酶催化的。

(2) 氧化脱氨基作用，主要在谷氨酸脱氢酶作用下，使氨基酸经过氧化作用而脱去氢。

以上两种脱氨基作用方式常常构成一种联合脱氨方式（图3-2-4）：

2. 氨的代谢

氨基酸由于脱氨基作用产生了氨，对机体有二重性，一是可

以被利用，一是有毒，易造成危害。但生物在长期的自然选择过程中，逐渐形成了解决这一矛盾的代谢方式。

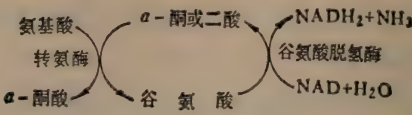
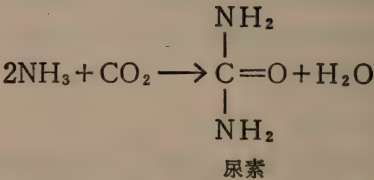


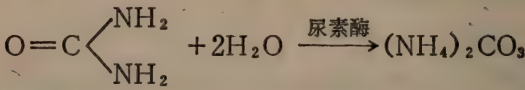
图 3-2-4 联合脱氨作用示意图

在人和动物体内，能够利用 CO_2 与氨，通过“鸟氨酸循环”形成无毒的尿素，随尿排出体外。

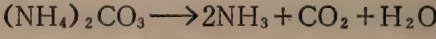
总的反应式为：



尿素经微生物产生的尿素酶的作用，生成碳酸铵。



在酸性环境中，则进行下列反应：



污水可以通过微生物的氨化作用而得到净化，特别是对蛋白质和氨基酸含量较高的富营养化的污水效果更好。

氨化作用产生的氨，在自然界中可被植物或微生物吸收，或继续氧化成硝酸，或挥发流失。

3. α -酮酸的代谢去向

氨基酸经过脱氨基以后，剩下的部分称为碳骨架，这些 α -酮酸可以转变成葡萄糖、乙酰乙酸和氧化成 CO_2 与水，并释放出能量。具体有以下几种去向。

(1) 经 TCA 循环直接降解：有些氨基酸失去氨基后剩下的碳骨架正好是TCA的中间产物，如丙酮酸， α -酮戊二酸，草酰乙酸，可直接进入TCA 循环进行彻底氧化降解，并产生能量。

(2) 生成新的氨基酸： α -酮酸经转氨作用或脱氢作用的逆反应重新形成氨基酸。

(3) 转化为糖：如碳骨架是糖代谢的中间产物，就可进一步转化为糖，这些氨基酸称为生糖氨基酸，如甘、丙、丝、苏、半胱、缬、组、谷、天冬、精、脯等氨基酸。

(4) 转变为脂：氨基酸脱氨后生成的 α -酮酸，如果能转变为乙酰乙酸或乙酰辅酶A，可看作为生酮氨基酸，这种物质可以转化为脂肪。

在前边三类物质的分解代谢讨论中，我们已经在很多方面看到了它们之间的联系。为更清晰地了解这些关系，现将其概括为图3-2-5。

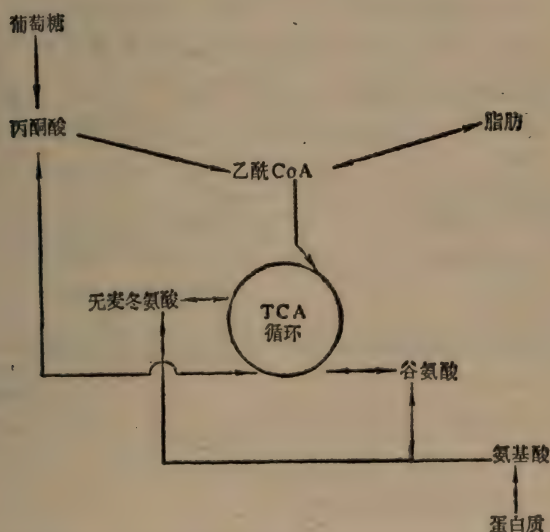


图 3-2-5 糖、脂肪、蛋白质代谢的相互关系示意图

由此可见，在三大物质代谢中，以糖居首要地位，由它可以形成其他物质；TCA 循环是各种物质彻底氧化的必经之路；三大代谢过程是一个氧化还原过程和供给能量的过程。

第三章 废水处理的生化反应

污染物进入水体后，发生沉降、凝聚和扩散等物理过程，也发生非生物和生物降解与合成等化学和生物化学过程。污水生物处理的实质就是污物被生物生化代谢的过程。

一、好气和厌气生物处理的基本原理

污水生物处理，就是连续性培养混合微生物，通过微生物的生物化学代谢过程，使污物进行氧化分解与合成，由有机物变成无机物，从有毒变为无毒，由不稳定状态变成稳定状态，使污水得到净化和达到排放标准。通常采用好气和厌气两种方法进行污水生化处理，它们的生化机理是不同的。R.P.Canale(1971年)将污水生化处理的生物化学反应概括为图3-3-1。

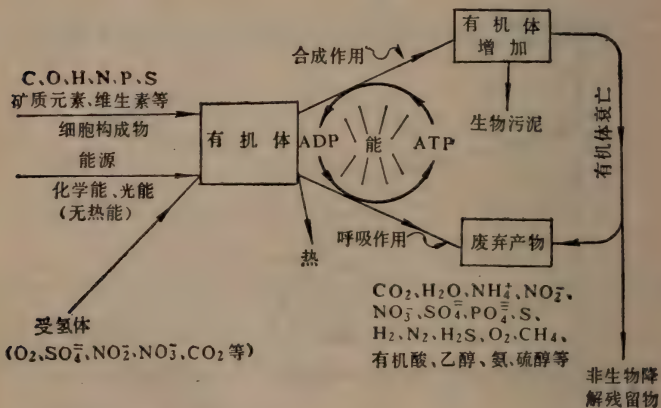


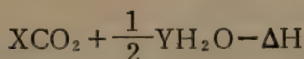
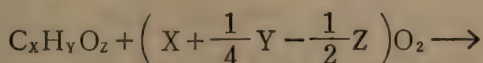
图 3-3-1 废水处理的生化反应

(一) 好气生物处理的机理

好气生物处理法是将废水中的有机物氧化分解为 CO_2 、 H_2O 、 NO_3^- 或硝酸盐等稳定化合物，或通过生物絮凝体的形成和对有机

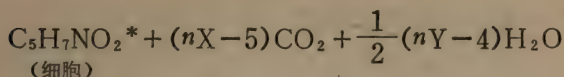
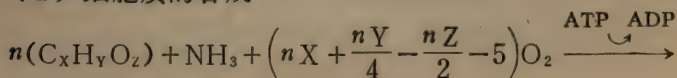
物的吸附作用，将有机物转化为沉淀物，通过二次沉淀池去除掉。代谢产物的形成是好气呼吸，生物絮凝体的形成是生物合成过程。好气生物处理过程中有机物（以 $C_xH_yO_z$ 表示）氧化与合成反应如下：

（1）有机物的氧化



即有机物被氧分解成 CO_2 和 H_2O 。

（2）细胞质的合成

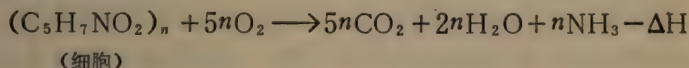


这一反应式表示了生物污泥的增殖和细胞的合成。

然而，这个反应式只对单一化合物的糖类和无机盐比较合适，而对混合底质则不适用。所以它只能作为理解底质与微生物在净化过程中进行反应的一个模拟公式而已。

（3）细胞质的氧化

如果供给的有机物数量很少时，细胞物质即进行自身氧化，也就是进入所谓的“内源呼吸”阶段。最后细菌由于缺乏能量而死亡。其反应式为：



上述各反应式中 $C_xH_yO_z$ 为污水中的有机物；

$(C_5H_7NO_2)_n$ 为活性污泥生物体的细胞质。

* 在正常情况下，各类微生物细胞质的成分是相当稳定的，常用下列实验式表示：细菌 $C_5H_7NO_2$ ；真菌 $C_{10}H_{17}NO_6$ ；藻类 $C_5H_8NO_2$ ；原生动物， $C_7H_{14}NO_3$ 。

在生活污水中的有机物绝大部分是人们食物的遗弃物和残余物及排泄物，均为天然有机物，如醣类、蛋白质、脂肪、纤维素等，它们在水体内容易被降解。其降解的机理是在微生物的作用下（酶的作用），使较高分子化合物水解成低分子的化合物，进一步氧化分解为水和 CO_2 。这个生化代谢过程的中心环节就是本篇第一章所讲的EMP途径和TCA循环。因此，凡在有机物降解过程中，一旦生成属于TCA循环上的化合物时，在有氧条件下，即进入此循环进行彻底的氧化。

废水中所含的各种有机物质氧化与合成的比例随有机物的性质和微生物的种类等而有所不同。一般情况下，生物处理构筑物内新生长（增加）的细胞物质等于所合成的细胞物质减去由于内源呼吸而耗去的细胞物质，可用下式表示：

$$\Delta S = aL_r - bS_a$$

式中 ΔS ——新生长的细胞物质（公斤/日）；

L_r ——所利用的食料，即去除的 BOD_5 （公斤/日）；

S_a ——构筑物内原有的细胞物质（公斤）；

a ——合成系数〔合成的细胞物质（公斤/去除的 BOD_5 （公斤）〕；

b ——细胞自身氧化率或衰减系数（1/日）。

a 和 b 的值可以通过试验确定。生活污水和性质与之相近的工业废水， a 一般可取0.5~0.7， b 可取0.05~0.1。

（二）厌气生物处理的机理

与好气生物处理相反，在无氧条件下，由厌氧菌或兼性菌所进行的处理，称为发酵（消化）。发酵方式的基本代谢径路之一就是EMP途径。作为污泥发酵（消化）中有机物分解的全过程，大致经历两个阶段，即（1）酸性发酵阶段，这是有机物分解的初期，微生物活动的分解产物是有机酸、醇、 CO_2 、氨和硫化氢等，由于这一阶段有大量的有机酸积累，pH下降，所以叫做酸性发酵阶段，参加的微生物统称为产酸菌。（2）在分解后期，由于产生的氨的中和作用，同时另一群称为甲烷菌的微生物开始

分解有机酸和醇，产物主要是甲烷和 CO_2 ，随着甲烷菌的繁殖，有机酸迅速分解，pH逐渐上升。故称为碱性发酵阶段。这个过程可用图3-3-2来表示。

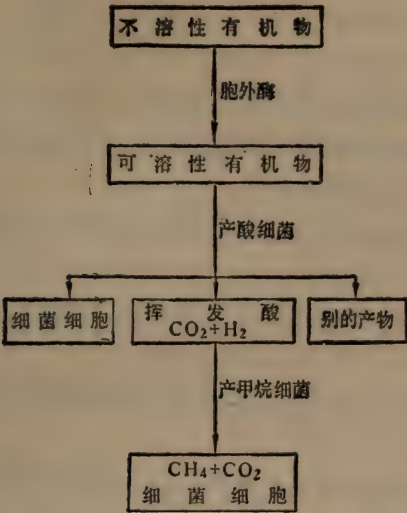


图 3-3-2 有机物的厌氧生物分解

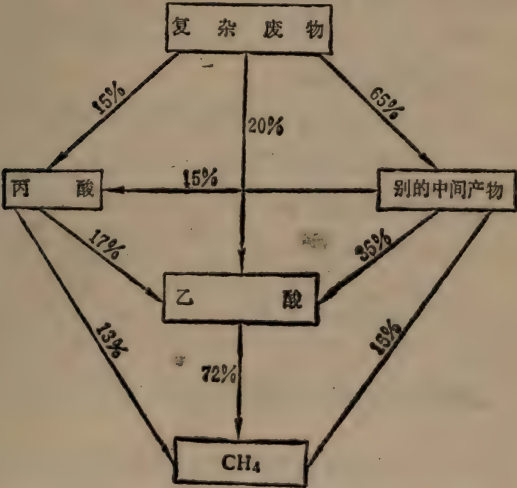
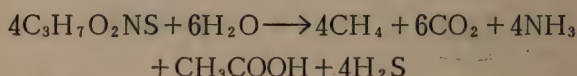


图 3-3-3 厌氧分解的甲烷形成来源

根据Jeris和McCarty(1963年)用放射性示踪原子的研究结果,进一步揭示了在厌氧条件下,有机物转化的量的关系。对于理解有机物质厌氧分解是有益的,这些结果如图3-3-3所示。

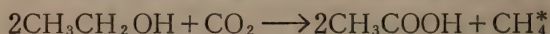
由图3-3-3可以看出,有70%的甲烷是从乙酸形成的,大约30%的甲烷是从CO₂形成的(Smith等,1966年)。在污泥消化微生物一节中,我们说过,根据Toerien(1969年)的综合评论,他认为不产甲烷细菌,形成的主要最终产物是乙酸、丙酸和丁酸,也可能是蚁酸和乳酸。在消化器中也可能产生琥珀酸,但可能迅速地脱羧基成为丙酸。

R·P CanAle(1971年)提出有机物厌气发酵的化学反应如下:

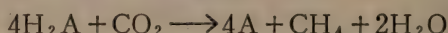


P.R.DuGan(1972年)的综合资料指出在甲烷生产中发生下列典型反应:

(1) 乙醇被氧化成乙酸和二氧化碳被还原成甲烷:

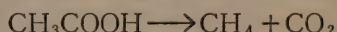


这个反应可以写成下列通式:

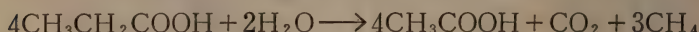
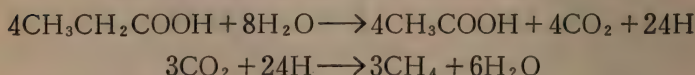


此处H₂A为伯醇或仲醇。

(2) 乙酸可以经过发酵分解成甲烷和二氧化碳:



(3) 丙酸发酵比较复杂,其化学反应如下:

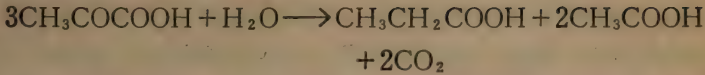


(4) 丙酮酸可以通过丙酸杆菌属(*Propionibacterium*)转

* Bryant等(1967年)指出:这个反应为两个不同细菌种的作用产物:S菌:

$2\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH} + 2\text{H}_2\text{O} \longrightarrow 2\text{CH}_3\text{COOH} + 4\text{H}_2$, M.O.H菌 $34\text{H}_2 + \text{CO}_2 \longrightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$.

化成丙酸和乙酸，化学反应为：



这些产物然后按（2）和（3）化学反应方程转化成甲烷。

（三）污水好气性生物处理与厌氧性生物处理之间的相互关系

好气性微生物与厌氧性微生物的物质分解代谢的共同之处，就是二者都要经过EMP途径，因而它们之间就必然有联系，这里我们试图将整个污水处理的基本原理和方法之间的相互关系、物质代谢途径与产物之间的内在联系，以及不同微生物群系在物质转化中的作用等等，作成图3-3-4，以便对污水处理的生化机理有一个比较简单而又完整的了解。

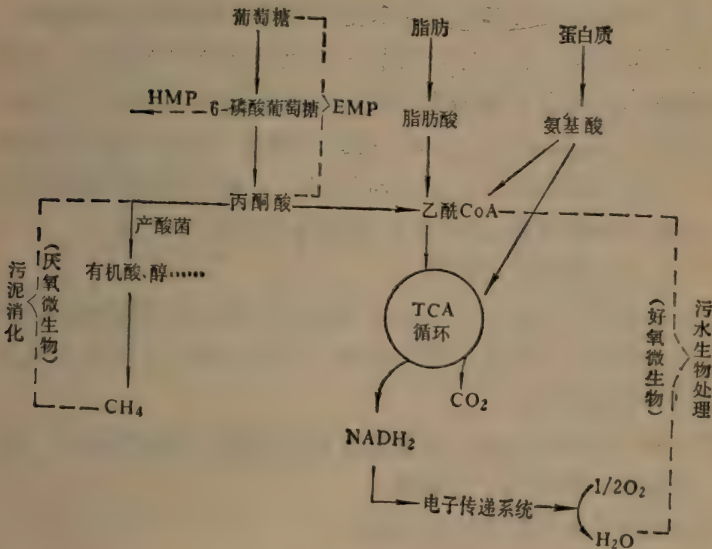


图 3-3-4 好气与厌氧生物处理的关系示意图

二、工业废水处理中某些有机物质的转化

上边介绍了生活污水中有机物在生化处理中的分解机理问

题。工业污水中含有各种各样的有机物质，有的可以被微生物分解代谢，有的则不可被代谢利用。近年来虽有不少关于工业废水生化处理的试验研究，但其处理的机理仍不很清楚。这里仅就目前遇到的一些有关问题作以简单的介绍。

(一) 芳香族化合物的转化

芳香族碳氢化合物有苯、甲苯、二甲苯、异甲苯、酚、间甲苯等；多核的芳香族化合物有萘、菲和蒽等。目前在环境保护上被引起重视的主要是挥发性的一元酚，尤其是苯酚（简称酚）、甲酚和苯酸，它们在水中常见。极毛杆菌属中的嫌恶极毛杆菌（*pseudomonas putida*）、铜绿色极毛杆菌（*p.aeruginosa*）、荧光极毛杆菌（*p.fluorescens*）和诺卡氏菌（*Nocardia*）等均可使其降解，一直进行到生成水和二氧化碳为止。一些芳香族类降解过程如下（见203页）。

我国一些含酚工业废水已经开始应用微生物方法进行处理，收到了较好的效果，如北京、吉林、南京等地都用于生产。武汉微生物所曾分离出了分解酚类物质能力很强的两种细菌。其中食酚极毛杆菌（*p.phenolphagum*）在20小时内可完全分解0.1%浓度的酚；解酚极毛杆菌（*p.phenolicum*）可将同样浓度的酚分解87%，而且两种菌都能在0.2%的酚溶液中生长。

(二) 饱和脂肪烃的降解

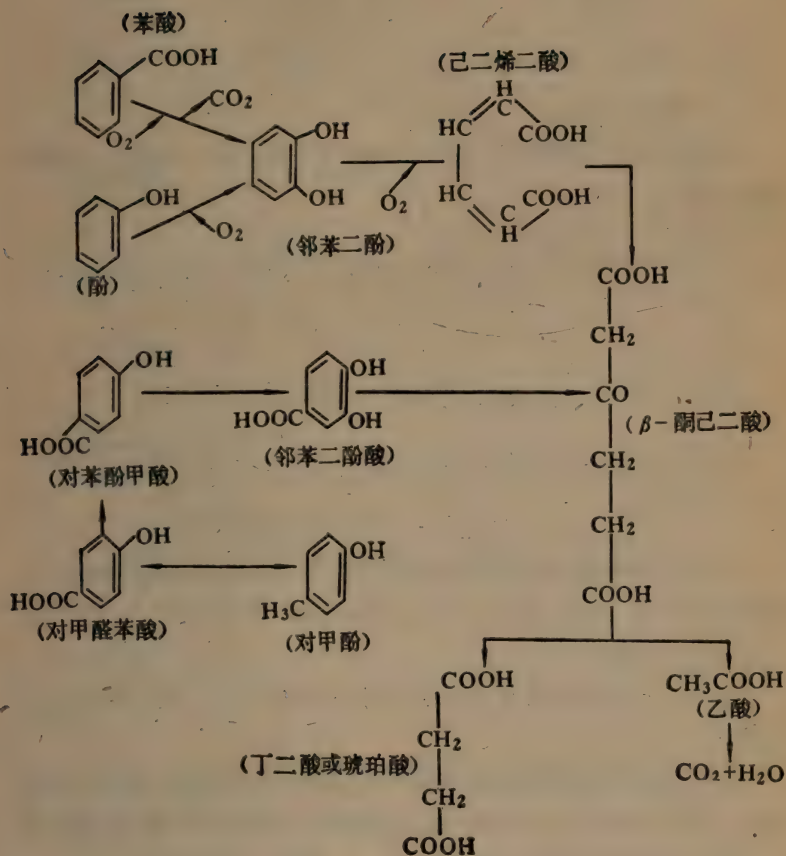
烷烃类碳氢化合物是石油的主要成分，近年来对其氧化机理进行大量的研究。一般直链饱和脂肪烃容易分解，但如引入甲基则难以被微生物利用。

微生物对烷烃的利用，首先是攻击烷烃最末端的碳原子，形成脂肪酸或醇，然后进一步氧化。

直链饱和烃的氧化有两条途径。

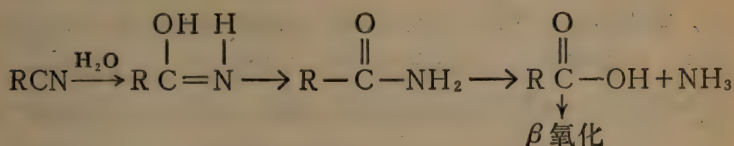
1. 过氧氢基化作用

这个过程是末端甲基氧化，即在氧化酶的作用下，氧进入烷烃，先形成烷基过氧氢化物，再经醇、醛氧化成脂肪酸，经 β 氧化形成乙酰辅酶A以后进入TCA循环。其过程如下：

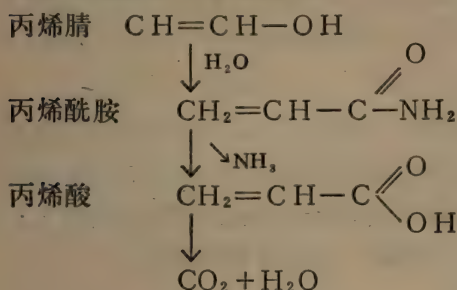


CN中的碳生成CO₂，N生成了NH₃。根据已有资料，氰化物的生物分解代谢途径大致为：

1. 有机腈的降解过程

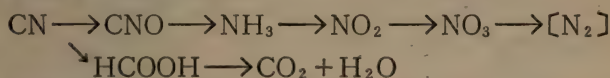


例如丙烯腈的分解反应为：



2. 无机氰的分解过程

其氧化径路大致如下：



以氰氢酸为例，它的分解氧化过程为：



其它如洗涤剂、有机农药等均可被微生物不同程度的加以降解，可参阅有关资料。

三、无机物质的代谢

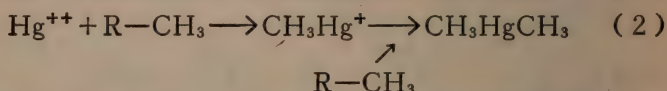
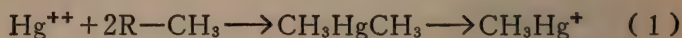
(一) 重金属在生物体内的转化

重金属对环境和生物具有潜在性污染的危害，特别象重金属汞化合物，在厌氧条件下，经细菌作用，通过烷基B₁₂的转化，

汞离子可以被甲基化，生成高毒性的甲基汞和二甲基汞，它们不易分解，这里主要介绍重金属汞在生物体内的转化。

1. 汞的甲基化

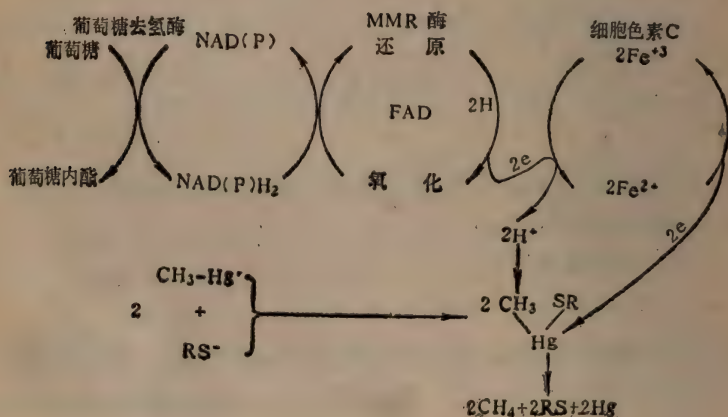
重金属汞、砷、铅等在微生物和动物体内，都能甲基化形成甲基汞、甲基砷等。Jensen和Jernlöf (1968年)研究了污泥中的厌氧微生物，能将无机汞转化为甲基汞，并提出以下两种反应式：



后来Wood等 (1970年) 又研究了汞离子被甲基钴胺素 (一种辅酶) 的非酶甲基化作用和酶催化汞的甲基化作用的机理，认为凡能合成甲基钴胺素的微生物都有合成甲基汞的可能性。有的研究证明在动物中甲基的转移，也需要钴的参与。

2. 有机汞的分解

K. Furukawa等 (1971年) 研究从苯汞污染的土壤中分离出假单胞菌K-62菌株，并对汞化合物还原分解机制作了详细的阐述。这种菌能吸着无机和有机汞化合物，并将汞还原为金属汞，排出体外。这种菌主要由于金属汞释放酶 (简称MMR酶)，细

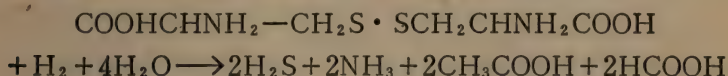


胞色素C和葡萄糖去氢酶等一系列作用，将甲基汞分解为无机汞。其反应机制如206页图示。

(二) 硫的代谢与细菌冶金

硫在自然界里有三种状态，即元素态、有机态和无机态，这三种硫素在微生物的作用下，可以互相转化（图3-3-5）。

从图上可以看出，绿色植物从土壤中吸收可溶性硫酸盐，合成含硫有机化合物，然后被动物利用，再形成动物含硫有机化合物。动植物死后被微生物分解，一部分为微生物利用，一部分形成硫化氢释放出来，如胱氨酸分解时，就形成 H_2S 。



在土壤中，由于 H_2S 对植物有毒害作用，则它又继续被微生物氧化成硫酸。硫酸与土壤中盐类结合成硫酸盐，供作物吸收利用。

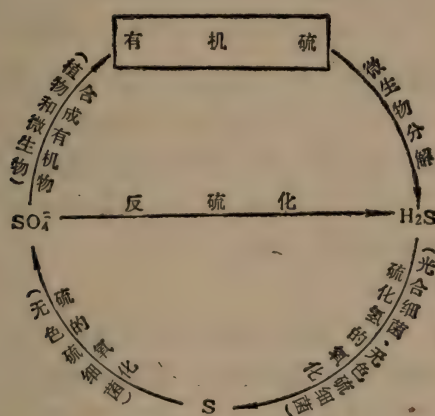
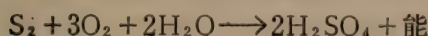
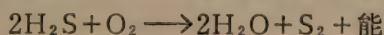


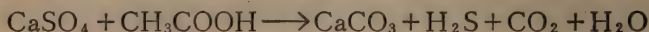
图 3-3-5 硫的循环

例如无色硫黄细菌，从氧化硫化氢和元素硫中取得能量：



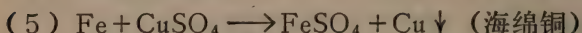
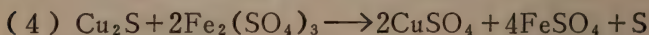
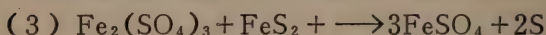
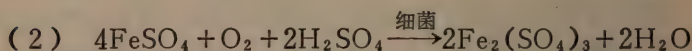
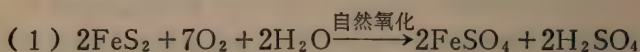


在缺氧情况下，硫酸盐也可以被微生物还原，产生硫化氢，进行反硫化作用。例如：

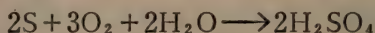


这样硫素就可以在微生物作用下，进行小循环。

目前关于细菌冶金就是利用一些硫化细菌的作用而进行的。例如细菌冶铜。就是利用氧化硫铁杆菌在生长过程中，把硫化矿物（黄铁矿）中的亚铁和硫，分别氧化成硫酸铁和硫酸。细菌在冶铜过程中的作用是：



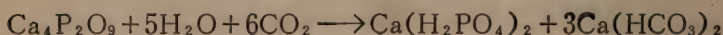
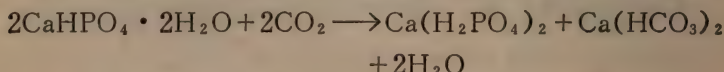
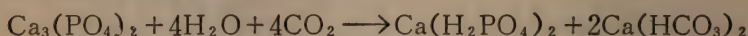
反应中所生成的硫在氧化硫杆菌作用下，氧化成硫酸：



细菌冶金也可用于锰、砷、锌等元素的提取，特别是对于溶浸贫矿、废矿、尾矿或火冶炉渣，充分利用矿产资源、化“废”为宝的综合利用有着重要的意义。

(三) 磷素代谢

在自然界中，磷以无机磷酸盐和有机磷化合物的状态存在，无机磷酸盐在土壤中主要是磷酸钙，它是非溶性的，只有变为可溶性以后才能为植物吸收利用，这一转化主要靠土壤微生物的活动产生的有机酸和 CO_2 。例如：

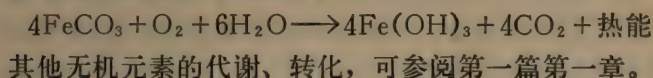


可溶性磷酸盐被植物吸收利用，合成有机磷化合物。植物含磷有机化合物被动物利用，转变成动物有机磷化物。动物、植物遗体中的有机磷化合物，在土壤中被微生物分解，形成可溶性磷酸盐再供植物利用，这就构成了生物磷素的小循环。

(四) 铁的转化

在自然界存在着转化铁的细菌，主要是衣细菌科和铁细菌科的细菌，例如锈铁细菌，多孢铁细菌等，它们能氧化亚铁为高铁而沉积在丝状体的鞘内。在细菌作用下，产生氧化（铁锈）排出，生成沉淀。当工业废水中存在可溶性的二价铁时，经细菌作用后则生成可沉淀的三价铁，使含铁废水得到净化。但是，由于它们生活在铸铁水管中，又可将铁管氧化成锈铁管，以至阻塞管道，给排水工程构筑物造成损害。

铁细菌对铁氧化作用如下：



第四篇 环境生物学研究方法概论

环境生物学是一门内容涉及面广、综合性很强的新兴学科，应当有其相应的一套研究方法，但目前还缺乏这样一套较为系统的适合于环境治理生物学的调查研究方法，需在今后实践中逐步建立和完善。在这里，我们简单地介绍一些目前作为环境治理生物学研究与工作中常用的野外调查和室内实验研究的基本方法。

第一章 环境污染的生态学研究方法

一、浮游生物的采集和保存

(一) 采样点的选择

在不同水域或不同污染区内，浮游生物的分布情况是不同的。因此，在采样以前，需要对调查的水域进行全面的勘察调查，了解水域受污染对水生生物的影响，然后选择有代表性的地点作为定性和定量采集的基点。一般来说，湖泊和水库除设置通过水体中心（线）的若干横断面外，入库的河口和库出口处均应设点。河流应于不同污染河段和污水排放口的上下游河流中设点采样。为了便于分析对比，还需要在调查水体的非污染区或邻近地区未受污染的同类水体中设点采样。

一旦采样点确定之后，将各点位置表示在地形图上，并避免轻易改动，以保证调查资料的连续性。

(二) 采集工具和方法

采集浮游生物的常用工具是浮游生物网，主要有两种。

1. 定性网

生物网是由不同号码的筛绢做成（表4-1-1）。

普通用的小型浮游生物网为圆锥形（图4-1-1），口径为20厘米，网长60厘米。制作时，可用直径为3~4毫米的铜条或铝丝作一环，来支撑网口；用金属或玻璃小筒，套结在网底，称为网头或集中杯，用来采集过滤的浮游生物。采集的时间长短可因浮

游生物多寡而不同，一般为10~30分钟。

表 4-1-1 定性浮游生物网规格

网 名	筛 绢 号 数	每英寸网孔数	网孔大小(毫米)	采 集 目 的
很粗网	000	23	1.024	巨型浮游动物
粗 网	3	58	0.333	大型浮游动物
中 网	10	109	0.158	小型浮游动物
细 网	25	200	0.064	浮游植物

2. 定量网

它和定性网的区别，主要是在前端装上一个帆布附加套（图 4-1-2），可以减少浮游生物在网口的损失。

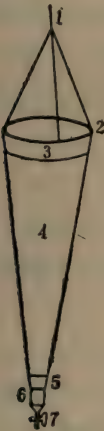


图 4-1-1 浮游生物网（根据小久保）

1—曳钢；2—金属环；3—帆布；4—筛绢；
5—帆布；6—筒；7—活栓



图 4-1-2 浮游生物定量网

如果知道网在水中拖曳的距离或时间以及网口的面积，就可以算出滤水容积，从而推算出在一定容积（米³）内的浮游生物数量。

应用浮游生物网采集时，可将网系在长竹竿或木棍前端，站在船上或岸边，将网放入水中约于水深半米处作“∞”形循环拖动。

拖网时间视生物密度而定，一般约10分钟后，将网慢慢提起，待水滤出，所有浮游生物聚集在网头内时，即可用玻璃瓶在网头下接好，打开活塞，使浓缩的浮游生物标本流入瓶中。如果水层太浅，不宜用网时，可用容器舀水于网中过滤，然后放入瓶中保存。浮游生物网用后须用清水反复冲洗，悬挂阴干，妥善保存备用。

3. 采水器

这是采集深水浮游生物时用的工具。最简便的是广口瓶底附加一铅块，使瓶沉入水中，瓶口加橡皮塞，并用细绳牢牢系在塞子中央。采样时，徐徐放松系于采样瓶上的粗线绳（绳子上做有尺度标记），使瓶沉到采样深度，轻轻拉出橡皮塞，水样进入瓶中，待水面已不再看见有气泡出现，表示瓶中已盛满了水样，即可迅速提取采样瓶，将水倒入另备的玻璃瓶中固定保存，所取水样应有一定的体积（如：1升、3升或5升），以便定量分析之用。

如果水深不超过2米，可在半米处采水；水深2~3米，分别在半米以内（离水面）和底层各采水一次；如水深在3米以上，可根据具体情况分层采水样。若系一般调查，可采取分层混合样（即各层水样等量混合）。

（三）浮游生物的固定和保存

如果采集到的标本不立即进行活体观察，则需要将它用药物固定以防腐烂，保存起来供将来处理。常用的药剂有：

1. 福尔马林

通常用的福尔马林含甲醛37~40%。一般固定浮游生物时常用3.7~4%的甲醛溶液。即于采得的标本水样中每100毫升加入约4毫升福尔马林。浸制鱼类标本则需用6~10%的甲醛溶液。

2. 碘液（鲁哥氏液）

将6克碘化钾溶于20毫升水中，待完全溶解后加入4克碘进行摇荡，待碘完全溶解后，加80毫升水即可取用。以此液固定的标本，一般形体不变，容易辨认。但它会使浮游植物体内的淀粉

变成黑蓝色，影响观察细胞内部结构，如果遇到这种情况，可在观察时，加入一滴硫代硫酸钠的溶液使其退色。碘是易挥发性物质，因此最好再加入2~4%的福尔马林溶液，以增加保存作用。

3. 酒精

螺蚌等标本的钙质贝壳易被福尔马林所腐蚀，因此最好用70~80%的酒精固定保存。

4. 苦味酸固定液（波恩氏固定液）

在100毫升蒸馏水中加入苦味酸结晶体，边加边摇，直到苦味酸不能溶解时即得饱和溶液，静止片刻，取上清液75毫升，注入试剂瓶中，加入福尔马林25毫升和冰醋酸3毫升，即成此液。

波恩氏固定液对生物组织保存较佳，细胞变态较少，适用于固定浮游动物。但苦味酸容易爆炸，应特别小心。

（四）浮游生物的定性和定量

浮游生物的定性和定量处理，就是对所调查的浮游生物进行种类鉴定和数量统计。这一工作对说明水体污染具有重要的意义。

1. 浮游生物的定性处理

对浮游生物既可进行活体观察定性，也可以用固定标本进行分类鉴定。

将采样直接放在载玻片上进行观察。某些生物活动过速，可在载片上适量加入稀浓度的麻醉剂，如水合氯醛，酒精等。也可以于载片上放少量棉纤维，以阻止活动；或用吸管抽取少量浮游生物沉淀样品于载片上，覆以盖片，进行观察。然后，将所观察鉴别的种类分门别类记录下来。

2. 浮游生物的定量处理

将所采集的水样（对浮游藻类、原生物一般采水1升，甲壳类动物采水3升，5升或10升，用25号网过滤）加入固定液，静置24小时以上，使其沉淀，然后用橡皮管轻轻吸出上清液，只剩30毫升的浓缩液作为定量计算的标本。

计数浮游植物时，先将浓缩标本轻轻摇动，摇均匀后，立即

打开瓶塞，用吸管从中心部分吸出 0.1 毫升标本液，注入容积为 0.1 毫升的计数框里，盖上盖片在镜下计算各类个体数目。计算完毕后，将框内标本洗回原标本瓶。

对个体较大的浮游动物计数时，通常应计算框内全部标本。必要时，需吸取 1 毫升到 5 毫升标本液进行计算。

浮游植物个体小，数量多，可计算框的十分之三（即 2、5、8 三行）。若数量不多时，也可全片计算。每一水样计算两片（即两个 0.1 毫升），然后将两次所得数值平均，如果两次计算结果误差大于 5%，则必须再计算 1~2 次，然后依下列公式换算成每升水中的浮游生物数量。

$$1 \text{ 升水中生物量} = \frac{\text{由 1 升水浓缩成的标本水量}}{\text{计算的标本水量}} \times \text{实际计算得到生物数量}$$

例如：1 升水样浓缩为 30 毫升标本液，取 0.1 毫升，仅计算它的十分之三，有浮游植物 300 个，则：

$$1 \text{ 升水中浮游植物数量} = \frac{30}{0.1 \times \frac{3}{10}} \times 300 = 300,000 \text{ 个}$$

如果用 5 升水样浓缩为 30 毫升标本水样时，可先用 5 除 30，即为 1 升水的浓缩量，其余以此类推。

通过对浮游生物的定性和定量处理后，根据其区系组或各类个体数量的相对丰度，结合底栖动物，鱼类毒性试验等的研究结果，与未污染区加以对比分析，就可能对调查水体进行水质污染的评价。

二、底栖动物的采集和定量

（一）采集和保存

底栖动物采样点应与浮游生物在同一采样点上进行。

采样工具可依具体情况而选定，如为一般浅水沼池、小河等水域，用铁铲即可采得泥样。水深的河流和水库，目前多使用采样面积为 1/17 或 1/19 平方米的改良彼得生式采泥器采集。每点采

样1~3次，将定性和定量泥样分别装入手提桶内，然后用分样筛进行筛选，洗去污泥，将筛选物放入瓷盘内肉眼检出所有活体底栖动物。置标本于70%酒精固定后，用puris胶将幼小的底栖动物装于玻片上，透明后在显微镜下观察鉴定种类，较大种类可用肉眼直接鉴定。

固定底栖动物时需要注意：

(1) 螺、蚌等软体动物需要用70~80%的酒精固定，不能用福尔马林，以免对壳的腐蚀。

(2) 昆虫、幼虫和甲壳类动物可放入小瓶中，先用50%的酒精固定后，再转入70~80%的酒精中保存。

(3) 环节动物如水蚯蚓等不可直接放入保存液中，必须先使它麻醉，否则它的身体收缩，成为不合格标本。最简便的麻醉办法是将动物置于玻璃皿中，加少量水，然后加95%酒精1~2滴，每隔10~20分钟再加1~2滴，直至虫体完全伸直，然后加入10%福尔马林，固定1~2日后移入70%酒精中保存。

(二) 底栖动物的定量

把采泥器采得的定量用泥样倒入金属筛内，用水冲洗。

普通金属筛可用同样大小的三个，叠成三层，上层筛孔较大，孔径约5~10毫米，中层筛孔径约1.5~2.5毫米，下层筛孔径约为0.5毫米。用水冲洗后，可逐层检查，统计其种类和它们的个体数量。或者用40目的分样筛也可进行筛选。

由于采泥器的口径面积一定，所以可以推算出一平方米面积的各类底栖生物的数量和重量。

根据对底栖动物的定性和定量调查，并对各个种类的生态习性作仔细分析后，就可能对水质的变化作出判断。

(三) 微型动物的简易观测法

微型动物由于体形很小，大多数种类容易收缩变形，所以应仔细在显微镜下进行活体观察，否则是很难正确区分各个种类的特征。

1. 形态观察

微型动物的观察方法和细菌相类似，主要有两种观察方法。

(1) 活体观察：用小橡皮头吸管，吸取观察之样品（如活性污泥混合液），放在洁净载玻片中央，然后用镊子盖好盖玻片。若水太多，可用吸水纸吸去一些。要严防气泡产生，以免影响观察。然后先用低倍镜头观察，再用高倍镜头观察。为了观察轮虫的咀嚼器，可用一大头针轻压盖玻片，咀嚼器即可从破碎的虫体中游离出来。原生动物口的位置和构造，在分类学上十分重要，必须首先看清楚。只有认清了口的位置才能区分虫体的腹背，左右和前后。原生动物的口一般位于腹面，相对一面为背面。在观察过程中，切勿首先使用高倍镜头。注意保持镜头的清洁与干燥。

(2) 活体染色观察：为了观察原生动物的构造，进行染色后方可看清。原生动物的核形状和部位与种类的区分有一定的关系。有一种简易的细胞核染色方法，即用百分之一的甲基绿水溶液，可将核染成绿色。染色时可用一吸管滴一滴染色剂，沿着盖玻片边缘慢慢透入其中，染料即可进入虫体内部，将细胞核染成深绿色。在球衣菌中已经说过，可用万分之一的结晶紫染一些丝状菌，也有助于观察。

2. 微型动物的统计与测量

在研究微型动物的生态特征时，不仅要注意了解其种类组成和数量分布，而且还要了解它们的个体生长状况（如大小）等。因此要进行种群数量统计（计数）和个体大小的测定工作。

(1) 微型动物的计数方法：这里主要介绍一种用来统计原生动物和轮虫的简易方法。这种方法是用一计数吸管，吸取一滴混合液放到载玻片上，进行显微计数，求出一毫升水样中虫体个数。具体作法如下：

1) 计数吸管每一滴水体积的标定：用一毫升蒸馏水（或普通水）于清洁的表面皿中，再用一洁净的橡皮头小吸管，从表面皿中将一毫升水全部吸尽，然后徐徐滴下，记下一毫升水的滴数，重复数次。将计数吸管一滴水中的虫体数乘以计数吸管一毫

升水的滴数，即为每毫升之虫体数。

2) 显微镜计数：将均匀污泥混合液用标定的计数吸管取一滴放在载玻片上，用方形盖玻片轻轻盖好，放在低倍镜下计数。移动载玻片，自上而下，自左到右的通过，观察和统计虫体数量，注意不可重叠和遗漏。也可以用微型动物计数板进行计数。

(2) 微型动物的测定方法：微型动物的大小多以微米为单位，用已校准的接目测微尺在镜下测量。其具体作法与微生物大小的测定相同。

三、鱼类毒性试验

有许多水生生物对水中毒物反应是很敏感的。用鱼类及其它水生生物的急性中毒或慢性中毒试验，以确定工业废水的毒性和安全浓度，这方面已有大量资料，但主要还是鱼类应用较多。下边主要介绍鱼类的毒性试验。

(一) 实验鱼的要求

1. 实验鱼的选择

用来进行试验的鱼最好是当地水体中生活的种类，对污染物质比较敏感，最好是能在较小的毒物浓度范围内即反映全部死亡和全部存活的鱼，并具有一定的代表性：能在实验室条件下饲养，来源丰富，个体健康。

鲤鱼和鲫鱼为国际性鱼类，也是我国的经济鱼类，有一定的代表性，目前国内外采用较多。金鱼由于对某些毒物敏感，饲养方便，鱼苗易得，所以也是运用较多的实验鱼类。

此外，我国的主要经济鱼类如鲢鱼，草鱼用作实验的较多，但生长很快，鱼苗时间性强，室内饲养有一定困难。

2. 实验鱼的大小和数目

实验鱼要求同批、同种、同龄，最好是当年生鱼。鱼的平均体长以7厘米以下为宜，金鱼以3厘米较为合适。最大鱼的体长不应超过最小鱼的1.5倍。

鱼类毒性试验，一般以每组试验10尾合适，太多影响观察，

太少影响精确度。

鱼在容器中的重量不应超过2克/升(试样),最好1克/升或少于1克/升。一般对于平均大小为5~7厘米的鱼,每条至少用水1升。

3. 实验鱼的驯养

新选来的鱼必须经过驯养,使其适应新的生活环境方可作为实验鱼。一般在正式试验前,于实验条件相似环境下(水温、水源)驯养7~10天,每天投一次鱼饵,正式试验前两天停止喂食。注意任何在行动或外观上反常的鱼,都不应作为实验用鱼。

(二) 实验条件

1. 实验容器与容积

试验的玻璃容器大小视鱼大小而定,一般以高30厘米到35厘米,直径30厘米的大圆玻璃缸或标本缸为宜。

2. 实验条件的要求

(1) 溶解氧:溶解氧是鱼类生存的必须条件。一般试样中的溶解氧含量不得低于4~5毫克/升。在实验液中不可进行剧烈地人工曝气,以免降低实验之毒性。如果溶解氧不足,可采用更换新鲜实验液,或采用恒流装置等。

(2) 水温:一般冷水鱼为12~18°C,温水鱼为20~28°C。

(3) pH值:不同种的鱼,有不同的适宜pH范围,一般控制在6.5~8.5之间。

(4) 实验用水:用来实验和驯养的水,必须是清洁水,可采用自然河水、湖水,用前需用脱脂棉过滤,除去大悬浮物。如采用自来水,须事先进行人工曝气或放置2~3天以上,使其中余氯逸出,并使水有充足的溶解氧。蒸馏水不应做为鱼类实验用水。

(三) 实验步骤

1. 预实验(探索性实验)

探索性实验的浓度范围应大一些,用鱼数量可少些,观察24或48小时即可。同时,须做一些化学测定,以了解实验液的稳定

性, pH 变化范围、温度与溶解氧的情况, 以便在正式实验中采取相应措施。

2. 实验浓度的选择

在进行水的鱼类毒性实验时, 用表4-1-2与表4-1-3中浓度值的对数系列。表中数值可用百分体积或毫克/升表示。

表 4-1-2 根据等对数间距选择实验浓度

一	二	三	四	五
10.0	—	—	—	—
—	—	—	—	8.7
—	—	—	7.5	—
—	—	—	—	6.5
—	—	5.6	—	—
—	—	—	—	4.9
—	—	—	4.7	—
—	—	—	—	3.7
—	3.2	—	—	—
—	—	—	—	2.8
—	—	—	2.4	—
—	—	—	—	2.1
—	—	1.8	—	—
—	—	—	—	1.55
—	—	—	1.35	—
—	—	—	—	1.15
1.0	—	—	—	—

实验中至少选五种不同浓度, 所选浓度最好有使实验鱼在24小时内死亡的浓度及96小时不发生中毒反应浓度。表4-1-2中1~3纵行浓度 (10.0、5.6、3.2、1.8、1.0等) 最常用, 为提高精确度可添加第四行的中间浓度, 第五行极少应用。表4-1-3中第一纵行浓度常用。

实验浓度选好以后, 最好每一浓度有2~3个重复, 另外再设一组不含毒物的对比组。

3. 实验中的指标及观察

表 4-1-3 根据0.1对数间距选择实验浓度

浓 度		浓 度 对 数
—	二	
10.00	—	1.00
—	7.94(或7.9)	0.90
6.31(或6.3)	—	0.80
—	5.01(或5.0)	0.70
3.98(或4.0)	—	0.60
—	3.16(或3.15)	0.50
2.51(或2.5)	—	0.40
—	1.99(或2.0)	0.30
1.58(或1.6)	—	0.20
—	1.26(或1.25)	0.10
1.00	—	0.00

实验开始的前4~8小时应做连续性观察并随时记录，然后可做24小时，48小时和96小时的详细观察记录。

观察的指标一般分为生物指标与理化指标。理化指标一般指水的溶解氧、pH、水温、水色、浊度等。生物指标是由于中毒引起鱼的生存，生态，生理及形态学，组织解剖学变化。发现死鱼立即移走。

4. 实验时间与毒性判定

正式实验最少进行48小时，最好96小时。当在96小时内鱼类没有表现出中毒症状时，可以延长时间进行安全浓度验证实验。

通常工业废水或实验液对鱼类的毒性大小用中间忍受限(TL_m)来表示，也有称之为半忍受限或半数存活率。它是指实验的鱼在规定的时间内(24、48、96小时)有半数(50%)致死的工业废水或实验液的浓度，是根据实验的结果，在半对数坐标纸上用直线内插法推导而得。

下面试举一例说明 TL_m 值的计算。表4-1-4所列数字为假定实验数据，图4-1-3即是根据表4-1-4中一些实验结果所作的图，得出24小时的半忍受限为6.7%；48小时的为4.7%；96小时的为3.56%。

表 4-1-4 按某实验数据推算废水中毒物的安全浓度

废水浓度体积 (%)	试验鱼尾数	试 验 鱼 成 活 数		
		24小时	48小时	96小时
10.0	10	0	0	0
7.5	10	3	0	0
5.8	10	8	2	1
4.2	10	9	7	2
3.2	10	10	9	7
2.4	10	10	10	9
对照组	10	10	10	10

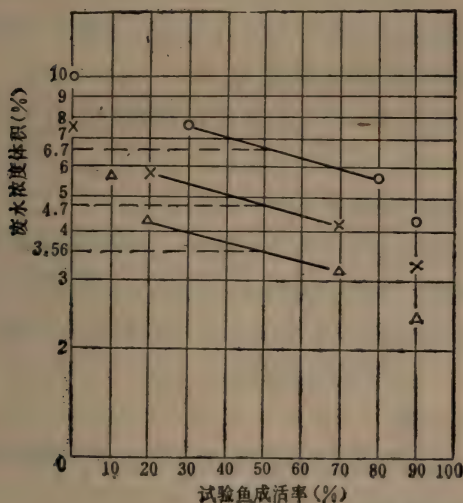


图 4-1-3 半忍受限计算图

○—24小时成活率；×—48小时成活率；△—96小时成活率

(四) 鱼类毒性实验结果的应用

根据鱼类毒性实验得到24小时 TLm 值及48小时 TLm 值，可以通过各种方法推导出安全浓度，用的比较多的一个推求公式如下：

$$\text{安全浓度} = \frac{48TLm \times 0.3}{(24TLm/48TLm)^2} \text{ (毫克/升)}$$

式中：48TLm——48小时半忍受限（毫克/升）；

24TLm——24小时半忍受限（毫克/升）。

应用公式求出安全浓度以后，还须做进一步的验证实验。一般用10条以上的鱼，在较大容器中用安全浓度液进行一个月或几个月的实验，最后确定确实验证某浓度对鱼类生存是安全的，可定为鱼类生产安全浓度。

由鱼类毒性实验所得到的数据，能够推算出可以排放到自然水体的污水量；也可以做为废水处理效果的鉴定指标和检查水体污染的指标等等。近年来已经开始注意了各种因素的综合作用及影响的研究。只有这样才能对水质评价做出更切实际的结论。

四、水中细菌的采集和测定

在水体污染的生物学调查中，细菌检查也是一项重要的指标。

（一）水中细菌的采集方法

一般在调查水体中选择若干采集点，然后用采水瓶于水面下10~15厘米处收集水样或底泥样本。采样时必须严守无菌操作程序。采回水样最好保持在1~5°C，并于6小时以内送实验室检验，以保证原水中细菌群不起变化。

（二）测定方法

根据规定，生活饮水必须进行细菌学检查，为选择水源和管理提供依据。水的细菌学检查主要包括以下两项：

1. 细菌总数的测定

细菌总数就是1毫升水样，在普通琼脂培养基中，经过37°C，24小时培养后所生长的各种细菌菌落总数。测定方法如下：

（1）以无菌采水瓶采取水样（井水、河水）500毫升。

（2）按水中细菌污染程度将水样进行稀释。例如在三个无菌试管中，分别各装入无菌水9毫升。以无菌吸管取水样1毫升加入第一试管，充分振荡使其混合后，吸出1毫升注入第二管，同

样混合后再取1毫升注入第三管，使成1:10、1:100、1:1000三种稀释浓度。

(3) 吸取未稀释和各稀释浓度的水样各1毫升，分别置于灭菌平皿内，按无菌操作各加入冷却到45°C的肉膏琼脂培养基10毫升，摇均匀。待凝固后，翻转于37°C温箱内培养24小时，计算其菌落数，求其平均值（每一浓度水样做三个平行重复）乘以稀释倍数，即得1毫升水样的细菌总数。

2. 大肠杆菌指数

大肠杆菌指数的测定方法有发酵法和滤膜法两种，这里主要介绍前一种。

(1) 接种的水量依水源性质而定。如检查自来水或深井水时，采取300毫升水样，分为100毫升两份，10毫升10份。若检查河湖水时，根据预计之污染程度取用下列各量培养。

1) 100毫升、10毫升、1毫升、0.1毫升各1份。

2) 10毫升、1毫升、0.1毫升、0.01毫升各1份。

3) 1毫升、0.1毫升、0.01毫升、0.001毫升各1份。

选用上述三个系列之一，将各份量的水样分别接种于蒲利氏培养基中。接种后于43°C温箱内培养24小时，观察有无混浊和产气现象，若无混浊和产气，可认为水中没有大肠杆菌存在。若发现有气体及混浊时，须继续作下一步试验。

(2) 自有混浊和产气的管中取出培养液，用划线接种法于远腾氏平皿培养基上，置37°C温箱培养24小时，如发现有红色，中心呈现金属光泽的典型菌落，可疑为大肠杆菌，再作涂片革兰氏染色检查，若未发现革兰氏阴性杆菌，证明水中无大肠杆菌，试验可终止。

(3) 若涂片中发现有革兰氏阴性杆菌，可将该菌再接种于10毫升蒲利氏培养基发酵管中，作第二次发酵试验，于43°C培养24小时，如未发现产气和混浊现象，仍认为水中无大肠杆菌；如有产气和混浊现象，则证明有大肠杆菌的存在，方可作出水被粪便污染的结论。

表 4-1-5 大肠杆菌指数与菌值检索表

100毫升水样阳性 发酵管数	0		1		2	
	大肠菌 指 数	大肠菌值	大肠菌 指 数	大肠菌值	大肠菌 指 数	大肠菌值
0	<3	>333	4	250	11	91
1	3	333	8	125	18	56
2	7	143	13	77	27	27
3	11	91	18	56	38	26
4	14	71	24	42	52	19
5	18	56	30	33	70	14
6	22	45	36	28	92	11
7	27	37	43	23	120	8
8	31	32	51	20	161	6
9	36	28	60	17	230	4
10	40	28	69	14	>230	>4

注：水样总量300毫升、100毫升2份，10毫升10份。

表 4-1-6 大肠菌指数与菌值检索表

发酵管 顺 序	指数、菌值 接 种 方 法	大肠菌指数			大肠菌值		
		①	②	③	①	②	③
		①	②	③	①	②	③
-----		<9	<90	<900	>111	>11.1	>1.1
----+		9	90	900	111	11.1	1.11
--+-		9	90	900	111	11.1	1.11
-+--		9.5	95	950	105	10.5	1.05
---++		18	180	1800	56	5.6	0.56
-++-		19	190	1900	53	5.3	0.53
-+-+		22	220	2200	46	4.6	0.46
+---		23	230	2300	43	4.3	0.43
-+++		28	280	2800	36	3.6	0.36
+--+		92	920	9200	11	1.1	0.11
+--+		94	940	9400	10	1.0	0.10
+---+		180	1800	18000	6	0.6	0.06
++--		230	2300	23000	4	0.4	0.04

注：“+”表示有大肠菌存在，“-”表示无大肠菌存在。

(4) 大肠菌指数与菌值的计算：根据第一发酵试验中发现有大肠杆菌的水量，份数，按表4-1-5和表4-1-6查出大肠菌指数和大肠菌值。

(三) 污染水体细菌变化及计算

在被有机物污染的水体中，由于营养丰富，所以细菌数量也多。对于流动水体的河流来说，在流动过程中，随着有机物的分解氧化，细菌数量也在相应地减少。因此，可以把河流划分为几段，测定其中细菌数值的变化，以表示水体被污染的状况和自净能力。常以水中细菌数量减少速度（以每小时细菌减少的百分率 P 表示，即在一小时流程内，上下游两测点间细菌数减少率）来表示水体的自净作用。细菌总数的减少率为：

$$P = \frac{(N - N_t) \times 100}{N t}$$

式中： t ——水自上游测点到下游测点的流动时间；

N ——上游测点每毫升水中细菌总数；

N_t ——下游测点每毫升水中细菌总数。

五、大气污染对植物影响的调查研究方法

大气污染不仅对人体健康有着严重的影响，而且对植物也有危害作用。不同植物对有害气体的反应是不同的。如何调查研究植物与大气污染环境之间的这种作用关系，目前仍然没有一套完整的方法。这里主要介绍有关调查研究的一些常用方法。

(一) 污染区植物调查法

在污染地区调查原有植物生长发育状况，初步查明大气污染与植物之间的关系。这种方法最为简便易行，具体方法如下：

(1) 选择观测点。主要以调查目的和实际情况进行布点。一般通过实地踏勘调查，在大比例尺地图上以污染源为中心，按方位或根据玫瑰图确定盛行风的下风向与上风向地区的主轴线，在野外依次由中心向外分别标出不同距离的观察点（如50、100、……3000米）。必要时也可设辅助点进行观察。

(2) 调查了解调查区内主要的大气污染物及其浓度，分布

扩散规律。

(3) 观测对象主要是树木, 农作物, 蔬菜或野生草本植物等。也可选择其中一类植物作观测对象, 一旦观测植物确定之后, 应做好明显标记和免受虫兽侵害的保护措施。

(4) 根据调查目的要求和人力条件, 确定观测的时间。

(5) 观测项目主要观察各类植物叶、芽、枝条等器官受害的症状表现, 特别注意仔细观察叶子受害后颜色, 叶形, 受害面积, 受害叶龄, 落叶度等。对农作物除此之外, 还要观察根系发育, 统计生长高度及产量等。

如果条件许可, 最好再取受害部分(如叶片), 观察内部组织结构受害状况和进行化学分析, 测定有害物质的积累数量。

也可以采用样方, 样条统计法进行调查。

在调查中, 如能配合观测气象, 土壤等环境因子的变化, 对于深入了解大气污染与植物的关系具有重要的意义。

(6) 根据调查和资料对比分析, 确定各种植物对有害气体的抗性等级, 如抗性强的, 中等的和抗性弱的。也可以把地区受害程度表示在地图上。

总之, 调查的资料及结果, 常常差异很大, 其原因主要是污染区有害气体各种各样, 环境因子错综复杂, 植物生长状况不一等等所致。因此根据要求和条件, 可以进行人工气候室的熏烟试验。

(二) 人工熏气试验法

这是在人工控制条件下, 用各种有毒气体, 对植物进行不同浓度的熏气试验, 研究植物对不同有毒气体的反应。这种方法的优点是气体的种类, 浓度比较准确, 条件易于控制, 植物比较整齐, 因此, 所得结果也比较可靠。但试验要求精密的设备, 而且气候室与自然条件总有差异, 故也存在一定的片面性。具体方法如下:

(1) 试验材料的准备: 用于试验的植物种类依研究目的而定。通常将选定的试验植物播种在试验园地或盆钵中。小区面积

以能被试验时用的密闭罩完全覆盖为宜。要求所有供试验植物生长发育正常，否则应予以及早拔除。

供试植物既可用全株，也可用枝条，一般每枝上保留各龄叶，叶片数为5~10片，枝条长20~30厘米，插入有水的沙箱内，每一试验均应设立对照试验。

(2) 人工室的制作：用玻璃或塑料薄膜制成小室，覆盖在小区供试植物上。小室大小，高低，长短，应依供试植物多少，大小而定，留有适当的余地。如广东植物所等单位用的木架玻璃熏气室，体积(1.55米×1.18米×1.70米)=3.11米³。内装电风扇两把，使室内毒气分布均匀。

(3) 有毒气体的制备及浓度测定：一般二氧化硫以亚硫酸氢钠与盐酸(或硫酸)发生，氯气以高锰酸钾与盐酸发生。现以SO₂制备为例，称取一定量的亚硫酸氢钠(95%)，放在玻璃杯中置于木框内分液漏斗下部。分液漏斗中盛有适量盐酸，试验开始时，从漏斗中慢慢滴下盐酸于玻璃杯中，使其与亚硫酸氢钠作用，产生SO₂扩散于小室内。小室内SO₂浓度应定时测定，如有变化应及时调整。

小室内SO₂的浓度可采用25ppm、50ppm、100ppm、200ppm、500ppm等。

在对照小区内，为防止有毒气体进入，可用活性炭的通气装置过滤进行处理。

(4) 熏气时间：一般试验浓度低时，暴露的时间长；浓度高，暴露时间短。

(5) 记录人工气候室内的气温，湿度，以及大气的温度和湿度。

(6) 观察的内容：如叶片受害症状出现时间，斑痕和颜色，叶片的脱落，受害叶龄及部位，气孔开放情况，叶片解剖特征，芽受害情况，有害气体浓度，暴露时间与植物受害程度的关系，以及受害后在正常环境条件下恢复生长的能力等。

(7) 根据植物对有害气体反应的主要特征，划分植物对有

害气体的抗性等级，与野外调查结果对照分析，最后作出植物抗性程度的结论，为生产实践提供科学依据。

（三）盆栽试验法

在污染区（如某一工厂）内外选择具有代表性的地点，设若干个试验区 and 对照区或进行盆栽试验，观察植物抗污染的能力。

一般盆栽试验是在各厂设2~3个点，每点内每种植物摆3~5盆进行观察记载，比较污染区与非污染区植物的表现情况，由此对植物的抗性 & 大气污染状况作出判断。

（四）叶片污染成分分析法

这一方面的工作目前仅仅限于对污染区植物叶子成分的分析，然后与未污染区同类植物加以比较，以确定植物对有毒气体吸收积累的能力，这一点对绿化树种选择更有其特殊意义。

一般情况下，通过上述四种方法，进行多次反复试验，就可以选出对有毒气体具有抗性强，或敏感的植物种类，以供城市和工矿区绿化与鉴别环境污染之用。

第二章 环境污染治理中的微生物研究方法

由于微生物的体积微小，所以研究方法和一般高等动植物是不相同的。研究微生物的方法多种多样，这里主要介绍环境治理生物工程中常用的一些微生物研究方法。

一、菌样的采集与增殖培养

根据试验研究之目的，收集不同的含菌样品。一般在收集菌样之前，首先调查了解所采集的菌样分布地方，哪里分布最多，怎样采取等等，这样就少走弯路。土壤是微生物的大本营，以细菌最多，放线菌次之，霉菌和酵母较少。腐木上纤维素分解菌较多；果实、密饴表面酵母较多；肥污的土壤和很多农作物的根际则富有固氮菌；在牛乳和各种乳制品、腌菜、泡菜等乳酸菌就比较多，凡此种种，都可作为采样的参考。总之，有什么样的环境，就有什么样的微生物，这都是采样中应该了解和掌握的微生物生态的基本知识。采样和保存的方法，因对象不同而不同，可

参考有关资料。

我们采集的菌样常常有两种情况，一种是含菌较多，可以直接进行下一步的纯化分离；一种是菌样中含菌很少，就需要经过增殖培养，使所需菌大量生产起来，以便筛选。增殖培养就是选择培养基的一种实际应用，这个过程中保证了所需菌的良好条件，有利于其生长繁殖，淘汰了其它菌，实际上起了初筛的作用。有时候通过增殖培养就达到了分离它们之目的。

二、培养基的制备

微生物的个体微小，因此大多数是观察细胞群，这种细胞群的特征往往代表了个体的特征。在实验室或工厂里常常用人工方法，把所需要的微生物分离开来单独地进行研究。

为了分离和保存微生物，以及对其生理学特性的研究，必须应用培养基，它是培养微生物的营养物质。由于微生物种类繁多，所以培养基的种类也就多种多样。

在设计培养基时，必须注意到：目的性明确，针对性强，经济节约，和参考已有的培养基成分作为设计新的培养基时参考。培养方法及培养基的种类可以概括为以下几方面。

（一）培养基的种类

根据培养基的化学性质，可以分为天然培养基，合成培养基与半合成培养基。凡是利用动植物，微生物或其它天然来源的，难以确知其成分的原料配成的培养基，称为天然培养基。它的营养成分复杂、丰富和全面，来源充沛，价格低廉，适合于配制实验室常用的培养基和生产上用的培养基。凡是用已知成分的纯试剂配成的培养基，称为合成培养基，其缺点是价格昂贵，配制不方便，而且一般微生物生长不良。为了克服这一缺点，有时在合成培养基中加入一定的天然成分，如马铃薯蔗糖培养基就是一例。

按照培养基的物理性质可分为固体和液体培养基，这两种培养基的成分一般是相同的，只是在液体培养基中加入凝固剂（常用的凝固剂为琼脂或称洋菜）即成固体培养基。

固体培养基可供菌种分离、鉴定、检验、计数、保藏等使用。大生产上也常用固体培养基，如糖化曲等。液体培养基适用于做细微的生理代谢等各项基本理论工作，也适于现代化的大规模发酵生产之用。

此外，根据试验研究之需要，还有诸如选择性培养基，鉴别性培养基，以及培养病毒等专性寄生的活组织培养基等。

(二) 常用培养基的制备

1. 细菌培养基

(1) 肉膏蛋白胨洋菜培养基

牛肉膏	3克	
蛋白胨	10克	
氯化钠	5克	
琼脂	15~20克	
水	1000毫升	pH7.4

将称好的各成分加水溶解，然后放入琼脂，加热溶化，补充水至1000毫升，调pH至7.4。根据使用要求进行灭菌备用。

(2) 合成培养基 (适于大肠杆菌，枯草杆菌等)

葡萄糖	1克	
磷酸氢二钾	1克	
磷酸二氢钾	1克	
硫酸镁	0.2克	
氯化钠	5克	
琼脂	15~20克	
水	1000毫升	pH7.4

(3) 蒲利氏培养基 (检查水中大肠杆菌产气之用)

蛋白胨	1克
氯化钠	0.5克
甘露醇	1克
蒸馏水	100毫升

将蒸馏水，蛋白胨和氯化钠放入锥形瓶中加热溶解，冷却至45°C，调pH为7.2~7.4，再加入甘露醇，充分振荡溶解，灭菌

备用。

(4) 远腾氏培养基 (用于鉴别大肠杆菌, 属于鉴别培养基)

消化蛋白	10克
琼脂	20克
磷酸二氢钾	3.5克
水	1000毫升

将上述物质加热溶解后, 配成1000毫升。再称取乳糖10克, 无水亚硫酸钠5克, 10%碱性复红酒精溶液20毫升, 一起溶于50毫升蒸馏水中。然后将以上物质混合后灭菌备用。

2. 放线菌培养基

此种培养基的制备过程和前边细菌培养基差不多, 其成分配比如下:

(1) 高氏一号培养基

可溶性淀粉	20克	
硫酸镁	0.5克	
硝酸钾	1克	
氯化钠	0.5克	
磷酸二氢钾	0.5克	
硫酸亚铁	0.01克	
琼脂	20克	
加水	1000毫升	pH7.4

(2) 高氏二号培养基

蛋白胨	5克	
氯化钠	5克	
葡萄糖	10克	
琼脂	20克	
加水	1000毫升	pH7.2~7.4

3. 霉菌培养基

(1) 察氏培养基 (培养真菌用):

琼脂	2%	
氯化钾	0.05%	
硝酸钠	0.3%	
硫酸亚铁	0.001%	
磷酸二氢钾	0.1%	
蔗糖	3%	
硫酸镁	0.05%	
加水	1000毫升	pH7.0

合成培养基成分精确，重复性强，但价格昂贵，微生物生长一般，只适于实验室应用。

(2) 马铃薯蔗糖培养基 (用于培养真菌):

马铃薯	200克(10~20%)
蔗糖(或葡萄糖)	10~20克(1~2%)
琼脂	17~20克(1.7~2%)
加水	1000毫升
pH	6~7

将马铃薯洗净去皮，切成小块，加水煮沸，取其滤汁加水至1000毫升，然后加入其它成分，灭菌备用。

4. 酵母菌培养基

麦芽汁培养基：将干麦芽磨碎，1份麦芽加4份水，在58~65°C水浴锅内糖化3~4小时，煮沸，用布袋过滤，滤液稀释到5~6波美度，pH约6.4，然后加入2%的琼脂即成。

三、菌种的分离与筛选

自然界中微生物大都混杂在一起生活，所以要想研究其单个细胞，或生产上应用纯种，都需要进行纯种分离。获得纯种培养的方法，称为纯培养法，或称细菌分离和纯化。

(一) 分离方法

纯种分离方法很多，常用的分离方法有稀释平面分离法；选择培养基和稀释平面分离相结合的方法；加富培养基和稀释分离法相结合的方法，以及加热分离芽孢杆菌法等等。现在介绍以下几种。

1. 稀释分离法

稀释分离法有两种方法比较常用，一种是在液体培养基中稀释的方法，即预先计算在一定单位容积中所含有的微生物细胞数目；使稀释后在一定单位容积中如每两滴溶液中约只含有一个微生物细胞，以后每支灭菌而装有液体培养基的试管内接种一滴，摇匀静置数分钟，使细胞沉于管底，再置于温箱中，24~48小时后观察，如为酵母或霉菌时，可见管底只有一个菌落者，即证明此菌落由一个细胞繁殖而成。如此即可得纯种培养。此法适于较大的微生物。

另一种是在固体平板培养基上的集落分离法。这也是一种常用的稀释法。它是将菌样先作一系列稀释，然后再于平皿上培养，逐步挑选分离。如图4-2-1的上半部所示，这是稀释的方法。

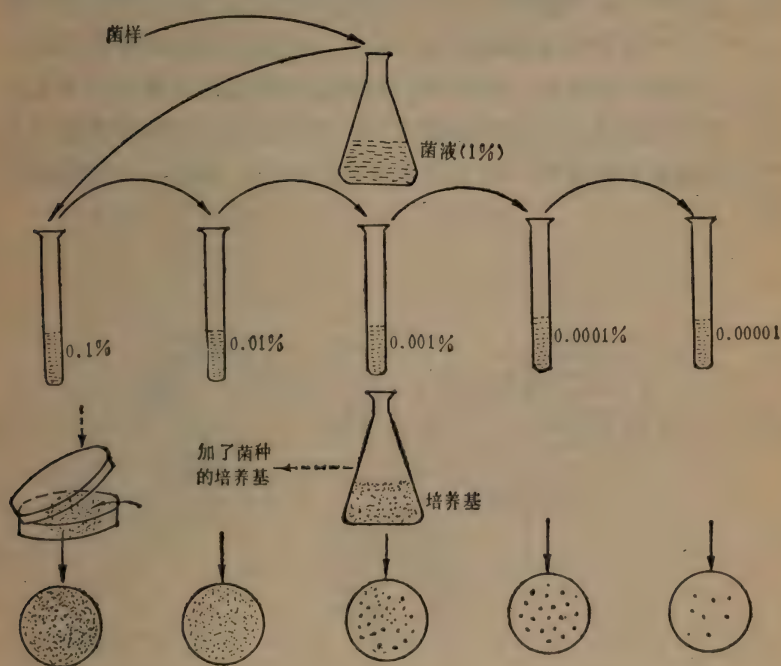


图 4-2-1 稀释分离示意图

即称取一克样品，放入99毫升无菌水的三角瓶中，充分摇匀，即为1%的稀释浓度。再从中吸取1毫升加入一支装有9毫升无菌水的试管中，摇匀即为1/1000的稀释液，依次稀释到万分之一，十万分之一……。一般要求每毫升菌液中含菌只有几个或十几个。这样在培养皿中培养出的菌落就容易辨认和挑选单一菌落。

稀释好样品以后，就进行纯种分离，如图4-2-1的下半部所示。用吸管依次吸取不同浓度菌液0.1~1毫升，分别置于已经灭菌的培养皿内，然后倒入冷至45~50℃的培养基进行摇匀，待凝固后，翻转培养皿于25~30℃培养1~2天，可见孤立的菌落，再用接种环从此单个菌落中挑取并移植培养，即可得到纯种培养。

2. 平板划线分离法

将溶化的琼脂培养基倾入无菌培养皿中，待冷凝后，用接种环沾取少许材料（菌样），在培养皿的培养基上依次连续划线（图4-2-2）。当接种环在培养基上移动时，细菌分散，这样在划线开始时，细菌分散度小，则培养后形成的细菌也就连在一起不易分开。但连续划线后，细菌逐渐减少，划到最后，细菌常常减少到形成单独孤立的菌落，再从中挑取进行移植，就可以得到纯种培养。



图 4-2-2 划线分离方式

3. 单细胞挑取法

这是从原始材料中只挑取一个单独细菌来培养，而得到纯种的方法。此法一般需要一架显微镜挑取器，装于显微镜上，用挑取器上的极细毛细管在镜下对准一个单独细菌细胞挑取，再接种到培养基上而得纯种。

(二) 生产性能的测定

从单株菌落中取得的纯种微生物就可以进行生产性能的测定，把其中符合生产要求的菌种挑选出来。测定的方法一般包括初筛和复筛两种。一般初筛是在培养皿上根据鉴别培养基的原理进行；复筛通常将微生物在三角瓶中作摇床培养，然后对培养液进行分析测定。这种条件和发酵罐比较接近，因此得到的结果更具有实际意义。近年来，国外也有用“琼脂块培养法”代替了大量的摇瓶培养工作，使初筛和复筛工作结合起来。

四、微生物的观察

(一) 显微镜及其观察法

显微镜是研究微生物的重要工具，现代显微镜的构造在实验中将要详细讲述。

显微镜的放大率决定于下面三个条件：

- (1) 目镜放大率；
- (2) 物镜放大率；
- (3) 镜筒的工作长度。

而放大率又受到清晰力和分辨力的限制。

清晰力（清晰度），是指物镜使目的物显示的能力。分辨力（分辨率）是指透镜分明两个很近小点的能力。

分辨力与光线波长和开口率之间的关系如下：

$$\text{分辨力} = \text{能见微细部分} = \frac{\text{光的波长}}{\text{开口率}}$$

从这个公式可以看出，光波愈短，开口率愈大，接物镜的分辨力也就愈高。在优良的接物镜上常常标明 N.A. 0.20 或 N.A. 0.65 或 N.A. 1.25 等字样，表示不同大小的开口率。

生物学上常用的是普通生物显微镜，可以放大到1000倍以上，一般酵母和霉菌放大100~400倍，细菌放大900~1000倍才能看清楚。要看病毒及细胞的细微结构，需用电子显微镜观察，可以放大到几十万倍。

一般常用的活菌检查方法有两种：

(1) 压滴法：取一菌样，放在洁净的载玻片中央，用盖玻片覆盖后，即可进行观察。废水生物处理过程中，常用此法观察生物相的变化。

(2) 悬滴法：将待研究的材料放在盖玻片中央，然后把盖玻片翻转放在凹面玻片中央，使菌液正好悬在凹处正中，周围抹一层凡士林，以保证悬液不致很快干燥，即可在镜下直接观察。此法多用于观察微生物的运动。

(二) 微生物的染色方法

在显微镜下的目的物与其背景色差愈大，则其轮廓显示愈清楚。微生物，特别细菌具有与其培养基相近的折光指数，因此在显微镜下观察时常发生困难。如果将色差增加，观察起来就比较容易，这就是细菌观察需要染色的原因。但染色后的标本都是死的，不能完全代表其生活的情况。

1. 染料种类

(1) 酸性染料：此种染料电离后染料离子带负电，如伊红，刚果红，藻红和酸性复红等，可与碱性物质结合成盐。当培养基中糖类分解产酸使pH下降时，细菌所带的正电荷增加，则可被酸性染料染色。

(2) 碱性染料：碱性染料离子带正电，可与酸性物质结合成盐。常用碱性染料有美蓝，甲基紫，龙胆紫，碱性复红，中性红，孔雀绿和蕃红等。细菌一般带负电荷，所以与带正电的碱性染料容易结合。因此在细菌学上常用碱性染料。

(3) 复合染料：碱性染料与酸性染料的结合物叫做复合染料，如瑞脱氏(Wright)染料与基姆萨氏(Gimsa)染料等。

2. 染色方法

(1) 单染色法：又称普通染色法，只用一种染料使细菌染色。如美蓝或复红液。实验室多采用此法来染一般的细菌。

(2) 复染色法：使用两种以上的染料，目的在于鉴别各种不同性质的细菌，因此又称鉴别染色法。主要的复染色法中以革兰氏染色法和抗酸染色法最为常用。

1) 革兰氏染色法：可以将全部的细菌区别为革兰氏阳性和革兰氏阴性两大类。这种染色方法是利用两种不同性质的染料，甲基紫染液或龙胆紫染液与蕃红或石炭酸复红染液进行染色的。先用甲基紫或龙胆紫染液处理后，经媒染剂（碘溶液）作用，再用酒精脱色，用蕃红或石炭酸复红复染。如果细菌能保留甲基紫或龙胆紫与碘的复合物而不被酒精脱色，即呈紫色的细菌叫做革兰氏阳性菌；如果细菌被酒精脱色再被复染液染为红色的，叫做革兰氏阴性菌。

革兰氏染色的机制各说不一，综合起来大致如下：革兰氏阳性菌等电点（ $\text{pH}2\sim3$ ）较革兰氏阴性菌的等电点（ $\text{pH}4\sim5$ ）为低。在相同的 pH 下，革兰氏阳性菌所带的阴电荷比革兰氏阴性菌的较多，因此吸取碱性染料之力较强，且不易脱色。加媒染剂碘液后，碘进入细胞与染料结合形成一种不溶于水的复合物，又稍溶于酒精与丙酮，此复合物与细胞壁的核糖核酸镁盐结合，使已着色的细菌不易脱色；但脱色剂含酸酒精进入革兰氏阴性菌后能溶解染料与碘的复合物，使细菌脱色，而阳性菌结合的染料既多且牢，并且酒精、染料及碘的酒精溶液不易透过它们的细胞膜，故不易褪色。

2) 抗酸染色法：此法用于鉴别抗酸菌与非抗酸菌。先用含有媒染剂的石炭酸复红染色，并在染色时加热使染料透入细菌内，再用含酸酒精使之脱色，并用美蓝复染。抗酸菌含有菌酸能与石炭酸复红结合得很牢，故能抵抗酸性酒精的脱色作用，最后呈红色。非抗酸菌则被含酸酒精脱色，而被美蓝复染为蓝色。

除上述染色法外，细菌的特殊构造，如芽孢、鞭毛、荚膜等必须用特殊的染色方法才能使它们在显微镜下显示出来。这些方

法可参考有关微生物实验指导。

五、微生物的测定

微生物的生长与繁殖的含意不同，前者是指原生质含量的增加，后者指个体数目的增加，所以测定的方法亦各不相同。

(一) 测定生长量的方法

1. 直接方法

(1) 细胞体积的测定：将一定量的菌液放在刻度离心管离心，观察沉淀细胞的体积。

(2) 称重法：可以测定干重或湿重。菌液经过离心或过滤后，经洗净即可得湿重，如果在 $105\sim 110^{\circ}\text{C}$ 下烘干至恒重，即可得干重。

2. 间接方法

(1) 比浊度法：用比浊管或分光光度计和光电比色计进行比浊。细菌悬液的光密度或透光度可用以表示原生质的量。

(2) 测总氮含量法：因为微生物含氮量一般比较稳定，所以常以其作为生长量的指标。细菌含氮量约为干重的12.5%，酵母为7.5%，霉菌为6%等等。含氮量乘以6.25就是该微生物蛋白质的含量。因此用凯氏微量定氮法测定出微生物的总氮含量，以此推算出原生质量，间接表示微生物的量。

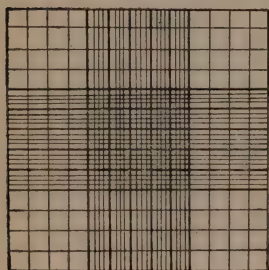


图 4-2-3 血球计数板

(3) 生理指标法：用代谢消耗或代谢作用所形成的物质代表生长量。例如耗氧量或糖类发酵产生的乳酸、 CO_2 等。

(二) 测定细胞数的方法

1. 测定总菌数

此法实际上是一种直接计数法，它包括活菌与死菌的总数。最常用的是血球计数板计数法。

血球计是一块特制的厚玻片。一般市售的血球计数板，在低倍镜下可看到方形的计数槽分为9区，四角的4区各分为16大格，中央的区由密集的刻度交织，被分成400小格（图4-2-3），计数槽的深度为0.1毫米，总面积为9毫米²，（每一区面积为9/9=1毫米²）由此可以计算出大、小格的体积如下：

$$\text{一大格的体积} = \frac{1}{16} \text{毫米}^2 \times 0.1 \text{毫米} = 0.00625 \text{毫米}^3$$

$$= \frac{1}{160000} \text{毫升}$$

$$\text{一小格的体积} = \frac{1}{400} \text{毫米}^2 \times 0.1 \text{毫米} = 0.00025 \text{毫米}^3$$

$$= \frac{1}{4000000} \text{毫升}$$

因此：

每毫升悬液中菌数 = 一大格中平均含菌数 \times 160000

或 每毫升悬液中菌数 = 一小格中平均含菌数 \times 4000000

测定方法：用无菌吸管吸取含菌样品于计数槽上，用特制盖玻片轻轻盖上，静置数分钟后，在显微镜下观察和计数。

一般情况下，在中央区共测5个大格，每一大格中测五个小格，然后求得每一小格中细菌的平均数，从而就可以折算出每毫升悬液的含菌数。

2. 测定活菌数

此法又称间接法，常用的方法有以下几种：

（1）平板菌落计数法：将菌液逐级稀释后，以一定量的稀释液于培养皿中，然后倒入熔化后冷却至45℃左右的培养基，摇匀后置保温箱中培养，从平板上出现的菌落数和稀释度计算出样品中的菌数来。

（2）稀释法：将菌液稀至不同浓度，一直稀释到该液少量（1毫升）接种到新鲜培养基后没有生长繁殖出现。根据没有生长的最低稀释度与出现生长的最高稀释度，推算出样品单位体积中

细菌数的近似值。

(三) 细菌大小的测定

细菌的大小可以利用目镜测微尺来测量。目镜测微尺是一块圆形玻片，在中央刻有一条5毫米长的等分线（图4-2-4）。但由于

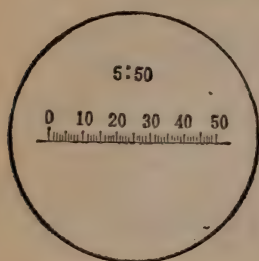


图 4-2-4 目镜测微尺

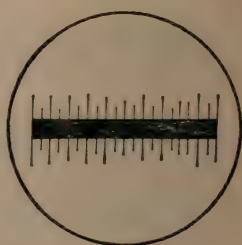


图 4-2-5 镜台测微尺

测量时将其放在接目镜中的隔板上，不是直接测量细菌，这样因为显微镜放大倍数不同，所以目镜测微尺刻度实际代表细菌的大小，在使用前，须用台镜测微尺校正，以求得在特定条件下目镜测微尺每一刻度所实测的长度。台镜测微尺（图4-2-5）是一中央部分刻有精确等分线的载玻片，一般为1毫米等分100格，每格10微米，是专为校正目镜测微尺刻度的间隔长度而用的。具体方法如下：

1. 目镜测微尺的校对

(1) 将目镜测微尺装入接目镜的隔板上，使刻度朝下。把镜台测微尺放于载物台上，使刻度朝上。

(2) 先用低倍镜看清楚镜台测微尺的刻度以后，转动目镜，使目镜测微尺的刻度与镜台测微尺的刻度平行，移动推动器定位，使两尺重迭，再使两尺的“0”刻度重迭。定位后，仔细寻找两尺第二个重迭的刻度（图4-2-6）。

(3) 计数两个重迭刻度之间两尺的各自格数。因为镜台测微尺刻度的实际长度已知，因此可由下列公式算出所校正的目镜测微尺每格所量的镜台上物体的实际长度：

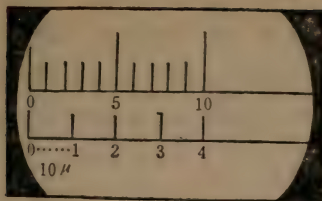


图 4-2-6 目镜微尺与镜台微尺校正时的情况

目镜测微尺每格长度(微米)

$$= \frac{\text{两个重迭刻度间镜台测微尺的格数} \phi \times 10}{\text{两个重迭刻度间目镜测微尺的格数}}$$

以同法分别校正高倍镜和油镜下目镜测微尺各格所量的镜台上物体的实际长度。

这里值得注意, 由于每一显微镜及附件的放大倍数各不相同, 所以, 校正目镜测微尺必须针对着特定的显微镜及附件(即特定的接物镜, 接目镜, 镜筒长度等)进行, 而只能在这一特定的情况下重复使用。

2. 菌体大小的测定

将染色的标本先在低倍和高倍镜下找到目的物, 然后在油镜下用目测微尺测量细菌的大小。先量菌体的长和宽占目镜测微尺的格数, 然后用目镜测微尺每格的长度算出菌体的长和宽。一般在同一涂片上, 测定10~20个菌体, 求出平均值的可变异范围, 才能代表该菌的大小。

例如, 目镜测微尺在某一显微镜的油镜下每格相当于1.3微米, 菌体长相当于目镜测微尺的2格, 则菌体长度应为:

$$2 \times 1.3 \text{微米} = 2.6 \text{微米}$$

六、灭菌、消毒与菌种保藏

灭菌(杀菌): 是指利用一些物理、化学或生物因素, 使物体表面或内部的全部微生物失去生命活力的作用过程。也就是杀死了包括芽孢和孢子在内的一切微生物。所用培养基和用具均需进行严格灭菌方可使用。

消毒：只能消灭物体上（内）的一些病原体，以防止其传染的一种卫生措施，也是一种不彻底的灭菌。

防腐：指用某种物理或化学因素来抑制微生物生长繁殖的方法，所以这仅是一种制菌作用。一般用来保藏食品、饮料或其他物品，使之不易变质。

（一）常用灭菌方法

1. 加热蒸汽灭菌法

常用的加热灭菌器有立式、卧式和手提式三种。这一方法主要原理是由于加压的结果，提高了蒸汽温度而达到良好效果的。使用此法时必须将灭菌锅内的空气排尽，否则会大大降低灭菌效果。本方法适合各种物品的灭菌，如各种培养基，生理盐水，工作服，玻璃器皿等。一般在 121°C （15 英磅/英寸²，或1公斤/厘米²）下，经过 15~30 分钟可以达到彻底灭菌效果。

2. 紫外线灭菌

在紫外线波长 2650~2660 Å 时杀菌最强，适用于无菌室内灭菌。一般用紫外灯功率较大时，照射 20~30 分钟即可达到灭菌要求。

其他如干热灭菌法，过滤灭菌法，巴氏消毒法等，均可起到一定的灭菌作用。

3. 消毒方法

这主要指的是一些表面消毒法，常用的表面消毒剂是：

- （1）福尔马林（甲醛）：用 10% 的甲醛溶液喷雾。
- （2）高锰酸钾溶液：配成千万分之一浓度即可。
- （3）石炭酸（即苯酚）：3~5% 的浓度可作无菌室灭菌。
- （4）来苏尔：用 2~5% 的浓度于灭菌室消毒。
- （5）酒精：70% 酒精常用于皮肤，器皿消毒。

（二）菌种保藏

菌种保藏是生产和科学研究上的一个重要问题，其目的之一是使菌种不致死亡或衰老；二是使菌种的优良性能保持下来，不易发生变异。因此国际上很多国家都设立专门的菌种保藏机构。

菌种保藏的方法很多，但原理都是大同小异。首先要选优良纯种，最好是它们的休眠体（分生孢子，芽孢等）；其次要创造一个有利于休眠的环境条件，如低温，干燥，缺氧和缺乏营养物质等，实验室常用的菌种保藏方法有以下两种：

1. 冰箱保藏法

把生长在斜面或半固体穿刺菌种放在4°C左右的冰箱中保存。此法简便，可保存各种微生物，保存期一般3~6个月，有些可保存数年。

2. 石蜡油封藏法

是在斜面或半固体穿刺培养的菌种上倒上灭菌后的石蜡油（高出表面约1厘米），使菌种与外界空气隔绝，然后放冰箱保存。适于各种微生物的保藏，保存期一般为1年以上。

菌种由于变异或衰老而发生衰退现象，一般培养时间愈久，愈容易发生退化现象，所以每隔一定时间要进行复壮。

第三章 其他研究方法

一、活性污泥生理生化指标的测定

活性污泥生理生化的研究，对于进一步了解活性污泥净化反应机理有着重要的意义。近年来，关于活性污泥生理生化指标的研究主要是微生物耗氧速度和脱氢酶活性的测定与应用，这两项指标都在一定程度上反映了活性污泥的底质降解活性，即净化能力，因此它们的测定是探讨净化反应机理的重要手段。

（一）活性污泥脱氢酶活性测定法

生物的呼吸是一系列的氧化还原反应，某种底质在受氢体的存在下，通过脱氢酶的作用而被氧化，氢移向其受体，底质继续氧化。活性污泥中的好氧性微生物，多是采取将底质中的氢通过细胞色素系统向氧过渡的方式。脱氢酶对毒物的作用非常敏感，其活性明显地受到毒物抑制而下降，因此，活性污泥脱氢酶活性测定，可以较快较好地反应活性泥的活性（或性能）。

测定活性污泥脱氢酶活性最常用的方法，是通过指示剂还原

变色速度，来确定脱氢过程的强度。其原理是根据指示剂在从氧化状态过渡到还原状态时具有稳定的颜色。常以亚甲蓝和2, 3, 5-三苯基氯化丁醌(又称氯化三苯代四氮茂 化氯 (TTC)) 作为指示剂，即作为受氢体。酶活性衡量的标准是亚甲蓝的退色，即在此情况下形成具有红色三苯基甲臌 (formazone) 的数量。前一种指示剂由于还原，从青色→脱色，在空气中自行氧化，反应不稳定，因此还原量不能定量测定；后一种指示剂由于还原，稳定，因此可以定量测定。由于这一方法操作简单，出结果迅速，因而最近广泛地用于活性污泥的研究中。

苏联的克里比茨卡娅和夫兰斯卡娅建议在杜别列克瓶中测定脱氢酶。酶的来源是正在进行工作的曝气池活性污泥的澄清液。具体测定方法如下：

1. 用亚甲蓝作指示剂测定脱氢酶活性

直接向瓶中倒进pH=7的试验水20毫升 (试验水指被研究的液体)，往球形贮存器中放入1毫升0.01%亚甲蓝溶液，把被研究液体放进瓶中加盖。从瓶中抽出空气，压力降到12~15毫米汞柱，把瓶密封，并放在温度为37°C的水浴锅中。待水浴锅中水温平衡之后，把贮存器中的亚甲蓝溶液倒进瓶中，并摇匀。从此刻起，记下亚甲蓝退色时间。用下式计算酶的活性：

$$A = 100 \times \frac{t_1}{t_2} \times 100\%$$

式中： t_1 ——试验溶液 (如城市污水) 加上所试验物质之试管的亚甲蓝退色时间 (分钟)；

t_2 ——对比试验 (如城市污水) 的亚甲蓝退色时间 (分钟)；

A ——酶的活性。

当 $t_1 = t_2$ ，说明被试验的物质在所给浓度下，不影响生物处理过程。若 $t_1 < t_2$ ，说明该物质被化学或生物氧化。为了确定化学氧化，平行设置不加生物体的试管。若 $t_1 > t_2$ ，说明该物质在已给浓度下，对活性污泥微生物有毒。

上述方法可同时测定20个以内的试样，脱色的延续时间不超

过30~40分钟，该法可用于任何无机的和有机的化学物质。

2. 用2, 3, 5-三苯基氯化丁糖作指示剂测定脱氢酶活性

苏联的罗果夫斯卡娅和奥列姆斯卡娅研究了用同体积（10毫升）带磨口的试管代替杜别克瓶。用2, 3, 5-三苯基氯化丁糖代替亚甲蓝，按生成三苯基甲腈的量，可以对脱氢酶的活性进行定量。向已充满混合液的试管加1毫升0.4%新配的2, 3, 5-三苯基氯化丁糖溶液，立刻把试管盖上，挤出多余的液体。把试管内的液体仔细摇匀，并放在恒温箱中培养。经2小时后，往试管中加入1毫升冰醋酸，以中断2, 3, 5-三苯基氯化丁糖的还原过程。过滤后加入95%的酒精20毫升至沉淀完全溶化。然后进行比色，以确定所形成的三苯基甲腈的数量。

（二）活性污泥微生物耗氧速度的测定

耗氧速度是活性污泥的重要参数，它反映了活性污泥氧化有机物的性能和特点。因此，可以用耗氧速度指标测定生物法处理工业废水的可能性，以及影响生物处理的极限浓度。利用耗氧速度的概念，可以使与生物处理有关的一些问题得到简便的和深入的研究。因此，国内外都比较重视它的测定技术。现在已经提出的测定方法有华氏呼吸仪法、库仑仪法、溶解氧测定法和微型生物监测仪法。这里主要介绍华氏呼吸仪法。

目前，国内主要应用SKW-2国产圆型微量呼吸仪，其工作原理是：在定温定容下，生物分解过程中的耗氧速度引起反应瓶内氧压力的下降，这种压力由差压计测定（生物代谢产物 CO_2 用碱液吸收）。根据差压计的读数，可以算出污泥的耗氧速度。

华氏呼吸仪，是由安装在恒温槽中的密闭反应瓶和与其连接的检流器所组成。呼吸仪装有14套反应瓶和压力计，由可控硅自动控制温度，振动频率为100~160次/分，反应瓶的容积为15~20毫升。投入反应瓶的活性污泥很少，一般混合液体积1~2毫升（相当于污泥固体4~8毫克）。当将活性污泥或混合液注入反应瓶中进行强烈的曝气时，则随着活性污泥对底质的分解，反应瓶内的氧也逐渐地被消耗，这时所发生的 CO_2 被KOH所吸收，

氧被消耗，压力减少，减压量通过检压器表示出来，并换算成消耗的 O_2 量。

一般试验是从曝气池中将活性污泥取出，向其中投加一定浓度的底质，测定出的 O_2 量即作为活性污泥的底质降解活性，并以此值大小评价活性度的高低。但这只是实验室的工作，在实际处理中是有距离的，其真实性是值得怀疑的。

因此，很多研究认为，与其说它作为活性污泥净化性能的指标，还不如说它是一种判断活性污泥能否分解某种物质和毒物影响程度的良好手段。

关于华氏呼吸仪的具体使用方法，在有关生理学实验指导中都有专门介绍。

（三）活性污泥ATP的测定

近年来，一些研究者已经提出测定活性污泥微生物的ATP（腺三磷）含量，作为活性污泥系统的一种控制参数，其优点是：ATP是一种存在于所有有机体内的主要生物化学成分；在稳定的生化处理系统内，ATP含量保持相对的恒定；ATP直接关系到活的生物量。但过去由于从微生物中提取ATP的方法比较复杂，因此未能作为检测活性污泥系统的实际参数。最近Kucnerowicz等（1979年）提出直接测定活性泥样品ATP的方法（即不经分离提取）。这个方法是将30厘米³的活性污泥混合液（ML），用270厘米³的TEA缓冲液（22°C）进行稀释，在Kenwood waring 混合器内混合1分钟使之均匀，再使其平衡10分钟（悬浮液a）。然后取这种悬浮液10厘米³加入90厘米³ TEA 缓冲液中，使其平衡10分钟（悬液b）。再加入释放ATP的试剂(NRB) 100微升，将混合物轻轻摇动10秒钟，然后进行荧光测定，从而获得与ATP相关的光量单位，与ATP的标准曲线进行查对，即可求出活性污泥中ATP的含量。

这一方法对测定活性污泥样品中微生物ATP来说既简便，又迅速可靠。而且是检测和控制活性污泥法水处理系统的一个有效方法，它为整个活性污泥系统的ATP检测和由此引起的动力学

控制展示了前景。

二、生物体内污染物质的检测方法

生物与环境是一个统一体。生物体内成分随环境的改变而变化，因此通过检测生物体内污染物质的含量，一定程度上也能反映该地区环境污染的状况，这是研究环境污染，监测环境污染的重要研究方法之一。

（一）生物样品的采集和制备

正确地采集和处理样品，是保证获得正确分析结果的重要环节之一，由于生物样品种类繁多，这里仅举几类主要生物样品的采集和制备方法，简介如下：

1. 植物样品的采集和制备

（1）采样：以环境监测为目的植物样品的采集，首先要明确目的要求，对监测对象的有关污染情况，污染物质及各种环境因素等进行调查研究，然后根据分析的目的和要求，选择代表样区和代表植株进行采样，并做好采样的各项记录工作。采样的方法大体包括以下几个步骤：

1）采样用具：包括剪刀、锄、铲、布袋、标签、绳子和记录簿等。

2）样品采集量：根据需要确定采集量，一般宜多不宜少，经制备后，至少有 50 克重的干样品。新鲜品含水量通常为 80~95%，应比干样品多 10 倍左右。水生植物，水果和蔬菜等含水量高的样品可适量增加。

3）采集方法：一般在确定样区内，以对角线五点采样或平行交叉间隔采样，5~10 个点混合成一个代表样品。然后装入布袋，填写标签、编号、采样地点、植物种类、采集部位、土壤种类、污染情况等，以便查对和分析时参考。

采回样品，在室内洗净，立即在干燥通风处凉干或鼓风干燥箱内烘干；用鲜样分析的样品，应立即送实验室处理和分析。

（2）样品的制备：根据分析要求，将原始样品按植物特性采用不同方法进行选取。如果实、块根、块茎、瓜菜类，先切成

块，按1/8或1/16块选取。粮食种子经混合后，平摊在玻璃板上，按四分法多次选取，然后进行制备。

1) 鲜样制备：凡测定植物体内易转化或降解的污染物，如酚、氰、亚硝酸、有机农药等，以及维生素、氨基酸、植物碱等项目，应用新鲜样品进行分析。称取选样100克，放入电动高速组织捣碎机碎杯中，加同样量的蒸馏水或无离子水，开动电动机捣碎1~2分钟，制成匀浆。也可以用研钵加以石英砂研磨。

2) 干样制备：样品经洗净风干或在60~70℃鼓风干燥箱、低温真空干燥箱中烘干。用电动磨碎机粉碎。有些如谷类作物种子要先经脱壳后进行粉碎，根据分析要求用40~100目筛过筛，保存在清洁的广口瓶中备用。

测定含金属样品时，为避免受金属器械污染，最好用玛瑙研钵研磨，用尼龙筛过筛，聚乙烯瓶保存。

2. 动物组织和材料的收集与制备

动物的尿液、血液、唾液、胃液、粪便及其他生物材料如毛发、指甲和动物脏器均可作为检验环境污染物的材料。这里主要介绍一些水产样品的制备。

(1) 鱼类：取大鱼（半斤以上）3~5条，小鱼10~30条，洗净后清除有关杂质，取可食部分200克，切细混匀，或捣碎成糊状，立即分析或在冰箱内保存。

(2) 贝类或甲壳类：洗净沥干后取可食部分100~200克，捣碎后立即进行分析或置冰箱中保存备用。

3) 海藻类：海带选取数条，冲洗干净后，沿中肋剪开，各取其半，混合均匀，按四分法取100~200克，贮存于冰箱或立即分析检测。

各种样品采集时，要注意做好记录。

(二) 生物样品中污染物质的测定

生物样品经过灰化处理，或经提取、净化、浓缩处理即可进行污染物的测定。目前在污染物分析中，可使用的分析技术和仪器，大体有下列几方面：

1. 光学分析法

光学分析法是较早地应用于环境污染物测定的一类方法。有机磷、有机硫、有机氯、有机氮杀虫剂，含砷、汞、铜和酚类的杀菌剂、脲类除草剂等农药的残留量，以及一些有毒重金属和非金属污染物，均可利用可见光线或紫外分光光度法进行测定，一般灵敏度达 $1\sim 0.1\text{ppm}$ ，高达 0.001ppm 。

近年来，原子吸收分光光度法，X-射线荧光分析和等离子体光源发射分析技术也开始在环境污染生物样品方面应用。

光学分析法主要有：

- (1) 可见光及紫外光分光光度法。
- (2) 红外分光光度法。
- (3) 荧光、磷光光度法。
- (4) 原子吸收分光光度法。
- (5) 发射光谱分析。
- (6) X-射线荧光分析。

2. 色层分析法

色层分析法是农药残留量分析中使用最广泛的一类分析方法。其中薄层分析是进行农药分析最简便的方法。近年来，用气相色谱法测定农药残留量等发展特别快，其灵敏度可达 10^{-8} 微克，分析迅速，结果准确。目前常用的色层分析法如下：

- (1) 薄层分析法。
- (2) 气相色谱法。
- (3) 高压液相色谱法。

3. 电化学分析法

电化学分析法是用应用示波性极谱仪测定有机磷、有机氯、有机氮和有机汞农药的残留量，以及金属及其化合物。常用的电化学分析法有极谱分析法和电位分析法，其中以电位分析法应用比较普遍。

其它诸如放射性分析法，核磁共振法和质谱法，生物测试与酶学法等，都是测定和评价污染物的重要方法。

测定生物体中污染物的分析方法多种多样，但总的来说，目前仍以光学分析法和色层分析法较为常用。究竟采用哪一种方法进行测定，可根据污染物的性质和实验条件而定。

附录一 常见细菌检索表^[16]

1. 细胞始终呈球状..... 2
 幼培养物中的细胞不呈球状，而是杆状或螺旋状... 9
2. 在无氮培养基中生长旺盛，并固定大气氮..... 3
 培养基中需要有无机氮或有机氮才能生长..... 4
3. 形成孢囊.....固氮细菌属(*Azotobacter*)
 不形成孢囊.....氮单孢菌属(*Azomonas*)
4. 革兰氏染色阴性，有体液时才能良好地生长
 奈瑟氏球菌属(*Neisseria*)
 革兰氏染色阳性或不稳定..... 5
5. 接触酶阴性，产大量乳酸..... 6
 接触酶阳性，如产乳酸，产量也不大..... 8
6. 发酵葡萄糖产气，在蔗糖培养基中产生由葡聚糖构成的
 粘质荚膜.....明串珠菌属(*Leuconostoc*)
 发酵葡萄糖不产气，在蔗糖培养基中不产生由葡聚糖
 构成的粘质荚膜..... 7
7. 细胞排列成对和链状（产右旋乳酸）.....
 链球菌属(*Streptococcus*)
 细胞排列成对和四联状（产消旋乳酸）.....
 足球菌属(*Pediococcus*)
8. 氧化葡萄糖产酸.....微球菌属(*Micrococcus*)
 发酵葡萄糖产酸.....葡萄球菌属(*Staphylococcus*)
9. 老培养物中的球状细胞在新培养基上萌发成杆状细胞，
 革兰氏染色阴性或不定；幼龄的杆状细胞又逐渐转变
 为球状细胞，革兰氏染色不定或阳性。杆状细胞呈多
 形态.....节细菌属(*Arthrobacter*)
 老培养物和幼培养物间无上述变化.....10
10. 在适当条件下细胞内形成芽孢.....11

- 从不形成芽孢.....13
11. 细菌杆状.....12
细菌球状.....芽孢八叠菌属(*Sporosarcina*)
12. 好氧或兼性厌氧, 发酵产酸产生除乳酸之外的其他酸
.....芽孢杆菌属(*Bacillus*)
微好氧菌, 同型发酵仅产乳酸.....
.....芽孢乳杆菌(*Sporolactobacillus*)
13. 在豆科植物根上形成根瘤, 并共生固氮
.....根瘤菌属(*Rhizobium*)
不能在豆科植物根上形成根瘤共生固氮.....14
14. 能自生固定大气氮.....15
不能以氮气为氮源.....18
15. 细胞直径 > 2 微米, 多卵圆形, 胞外产生粘液, 生长
迅速.....16
细胞直径 < 2 微米, 胞外产生类似胶状的物质, 生长
缓慢.....17
16. 形成孢囊.....固氮细菌属(*Azotobacter*)
不形成孢囊.....氮单胞菌属(*Azomonas*)
17. 类脂类颗粒在两极, 接触酶阳性
.....拜叶林克氏菌属(*Beijerinckia*)
类脂类颗粒散在细胞内, 数量较多, 接触酶阴性
.....德克斯氏菌属(*Derxia*)
18. 细胞杆状.....19
细胞螺旋状.....螺旋菌属(*Spirillum*)
19. 幼培养物革兰氏染色阴性.....20
幼培养物革兰氏染色阳性或不甚着色.....51
20. 在营养洋菜或营养明胶等培养基上产生非常明显的非
水溶性色素.....21
在培养基中不产生明显的非水溶性色素.....27
21. 菌苔紫色.....色杆菌属(*Chromobacterium*)

菌苔非紫色	22
22. 菌苔红色	23
菌苔黄色到橙色	24
23. 发酵葡萄糖, 周生鞭毛	沙雷铁氏菌属(<i>Serratia</i>)
不发酵葡萄糖, 极生鞭毛	假单胞菌属(<i>Pseudomonas</i>)
24. 菌苔扩展成一薄层, 细胞壁柔韧, 滑行运动	噬胞菌属(<i>Cytophaga</i>)
菌苔不扩展成一薄层, 细胞壁坚韧, 如运动则以鞭毛游动	25
25. 发酵葡萄糖产酸	欧文氏菌属(<i>Erwinia</i>)
不发酵葡萄糖, 氧化或对葡萄糖无作用	26
26. 极生鞭毛, 所产生的色素具有黄单胞菌的独特吸收峰 (在石油醚中为418、437和463毫微米)	黄单胞菌属(<i>Xanthomonas</i>)
周生鞭毛或不运动, 所产生的色素不具有黄单胞菌的独特吸收峰	黄杆菌属(<i>Flavobacterium</i>)
27. 不发酵葡萄糖	28
发酵葡萄糖	35
28. 无鞭毛, 短粗杆菌; 对数期细胞直径1.0~1.5微米, 杆状到球杆状, 静止期细胞近球形, 因而常表现为球状和球杆状细胞混杂; 革兰氏染色阴性或略保留紫色。氧化酶阴性	不动细菌属(<i>Acinetobacter</i>)
有鞭毛能运动或不具上述形态特征	29
29. 菌苔成皮革状, 细胞可形成菌胶团	动胶菌属(<i>Zoogloea</i>)
不具有上述性质	30
30. 可在pH4.5生长, 并可氧化乙醇为乙酸	31
在pH4.5不生长, 或不能氧化乙醇为乙酸	32
31. 可氧化乙酸或乳酸为CO ₂ 和H ₂ O	

-醋酸细菌属 (*Acetobacter*)
不氧化乙酸或乳酸为 CO_2 和 H_2O
.....葡萄糖细菌属 (*Gluconobacter*)
32. 极生鞭毛.....33
周生鞭毛, 1根或更多根.....34
33. 氧化酶阴性或微弱, 菌苔呈黄色, 不还原硝酸盐
.....黄单胞菌属 (*Xanthomonas*)
不同时具有上述特性.....
.....假单胞菌属 (*Pseudomonas*)
34. 产3-酮基乳糖或使植物根异常增生
.....土壤杆菌属 (*Agrobacterium*)
不具上述特性.....产碱菌属 (*Alcaligenes*)
35. 极生鞭毛或不运动, 氧化酶阳性.....36
周生鞭毛或不运动, 氧化酶阴性.....38
36. 发酵肌醇产酸.....邻单胞菌属 (*Plesiomonas*)
不发酵肌醇.....37
37. 对2,4-二氨基-6,7-二异丙基喋啶(O/129)敏感
.....弧菌属 (*Vibrio*)
对2,4-二氨基-6,7-二异丙基喋啶(O/129)不敏感
.....气单胞菌属 (*Aeromonas*)
38. 苯丙氨酸脱氨酶阳性.....变形菌属 (*Proteus*)
苯丙氨酸脱氨酶阴性.....39
39. 运动.....40
不运动.....47
40. 发酵葡萄糖产酸产气, 不产果胶酶.....41
发酵葡萄糖产酸不产气或产果胶酶.....
.....欧文氏菌属 (*Erwinia*)
41. 不利用柠檬酸为碳源.....42
利用柠檬酸碳源, 但可能迟缓.....43
42. 发酵甘露醇产酸.....埃希氏菌属 (*Escherichia*)

- 不发酵甘露醇产酸.....
.....爱德华氏菌属 (*Edwardsiella*)
43. 发酵阿拉伯糖产酸.....44
不发酵阿拉伯糖产酸.....沙雷铁氏菌属 (*Serratia*)
44. 发酵山梨醇产酸.....45
不发酵山梨醇产酸.....哈夫尼菌属 (*Hafnia*)
45. 甲基红试验阳性.....46
甲基红试验阴性.....肠细菌属 (*Enterobacter*)
46. 赖氨酸脱氨酶阳性.....沙门氏菌属 (*Salmonella*)
赖氨酸脱氨酶阴性.....柠檬细菌属 (*Citrobacter*)
47. 在含KCN培养基上生长48
在含KCN培养基上不生长49
48. 发酵柳醇产酸.....克雷伯氏菌属 (*Klebsiella*)
不发酵柳醇.....沙门氏菌属 (*Salmonella*)
49. 利用柠檬酸盐为碳源.....沙门氏菌属 (*Salmonella*)
不利用柠檬酸盐为碳源.....50
50. 赖氨酸脱羧酶阳性.....埃希氏菌属 (*Escherichia*)
赖氨酸脱羧酶阴性.....志贺氏菌属 (*Shigella*)
51. 抗酸染色阳性.....分枝杆菌属 (*Mycobacterium*)
抗酸染色阴性.....52
52. 分解纤维素.....纤维单胞菌属 (*Cellulomonas*)
不分解纤维素.....53
53. 强烈发酵葡萄糖产乳酸, pH可达4.0或更低, 接触酶
阴性.....乳酸杆菌属 (*Lactobacillus*)
对葡萄糖氧化, 弱发酵或无作用。接触酶阳性.....54
54. 在脱脂牛奶中可于72°C存活15分钟.....
.....微杆菌属 (*Microbacterium*)
在上述情况下不能存活.....55
55. 幼龄细胞为规则的不分枝长杆菌, 链状排列, 老培养
物中常有类球状细胞.....库特氏菌属 (*Kurtzia*)

- 幼龄菌不具有上述形态.....56
56. 老培养物的球状细胞在新培养基上萌发成杆状细胞，革兰氏染色阴性或不定；杆状细胞在老培养物中又转变为球状细胞，革兰氏染色不定或阳性。细胞呈多形态.....节细菌属(*Arthrobacter*)
- 杆状细胞呈多形态，但无明显的球状和杆状细胞互变的循环.....棒状杆菌属(*Corynebacterium*)

附录二 活性污泥中细菌在分类学上的位置表 [50]

目 (Order)	科 (Family)	属 (Genes)	部分 (Family—科)
假单孢菌目 (Pseudomonadales)	硝化杆菌科 (Nitrobacteraceae)	亚硝化毛杆菌属 (Nitrosomonas) 亚硝化球菌属 (Nitrosococcus) 硝化杆菌属 (Nitrobacter)	12. 革兰氏阴性菌, 化能无机营养型 (硝化杆菌科)
	假单孢杆菌科 (Pseudomonadaceae)	假单孢杆菌属 (Pseudomonas) 菌胶团属 (Zoogloea)	7. 革兰氏阴性, 需氧杆菌和球菌 (假单孢杆菌科)
	螺旋菌科 (Spirillaceae)	螺旋菌属 (Spirillum)	6. 螺旋菌和弧菌 (螺旋菌科)
衣细菌目 (Chlamydobacteriiales)	衣细菌科 (Chlamydobacteriaceae)	球衣细菌属 (Sphaerotilus) 纤毛菌属 (Leptothrix)	3. 鞘细菌
真细菌目 (Eubacteriales)	无色杆菌科 (Achromobacteraceae)	产碱杆菌属 (Alcaligenes) 无色杆菌属 (Achromobacter) 黄杆菌属 (Flavobacterium)	7. 革兰氏阴性需氧杆菌和球菌 (未定亲族)

目 (Order)	科 (Family)	属 (Genes)	部 分 (Family—科)
真细菌目 (Eubacteriales)	肠杆菌科 (Enterobacteriaceae)	埃希氏杆菌属 (<i>Escherichia</i>) 气杆菌属 (<i>Aerobacter</i>) 克氏杆菌属 (<i>Klebsiella</i>) 副大肠杆菌属 (<i>Paracalobacterium</i>)	8. 革兰氏阴性, 兼性嫌气杆菌 (肠杆菌科)
	微球菌科 (Micrococcaceae)	微球菌属 (<i>Micrococcus</i>) 八叠球菌属 (<i>Sarcina</i>)	14. 革兰氏阳性球菌 (小球菌科)
	短杆菌科 (Brevibacteriaceae)	短杆菌属 (<i>Brevibacterium</i>)	17. 放线菌及亲缘生物
	棒状杆菌科 (Corynebacteriaceae)	棒状杆菌属 (<i>Corynebacterium</i>) 微杆菌属 (<i>Microbacterium</i>)	
	芽孢杆菌科 (Bacillaceae)	芽孢杆菌属 (<i>Bacillus</i>)	15. 内生孢子型杆菌和球菌 (芽孢杆菌科)

目 (Order)	科 (Family)	属 (Genes)	部分 (Family—科)
放线菌目 (Actinomycetales)	放线菌科 (Actinomycetaceae)	诺卡氏菌属 (<i>Nocardia</i>)	17. 放线菌及其亲缘生物
显核细菌目 (Caryophanales)	显核细菌科 (Caryophanaceae)	线 菌 (<i>Lineola</i>)	
贝氏硫细菌目 (Beggiatoales)	贝氏硫细菌科 (Beggiatoaceae)	贝氏硫细菌属 (<i>Beggiatoa</i>) 丝硫细菌属 (<i>Thiothrix</i>)	贝氏硫细菌科
	亮丝细菌科 (Leucothrichaceae)	亮丝细菌属 (<i>Leucothrix</i>)	2. 滑走运动细菌 亮丝细菌科
螺旋体目 (Spirochaetales)	螺旋体科 (Spirochaetaceae)	腐败螺旋体属 (<i>Saprosira</i>) **	噬纤维细菌科 (Cytophagaceae)
以上资料引自伯杰氏手册第七版			以上资料引自伯杰氏手册第八版

* 线菌, 即巨大芽孢杆菌 (*Bacillus macroides*);
 ** 白螺旋菌 (*Spirillum albicda*), 即白色腐败螺旋菌 (*Saprosira abbida*) .

附录三 废水生物处理中常见的 原生动物检索表^[17]

关于废水中的微型动物分类，可参考有关资料。这里，选录了有关废水生物处理中常见的原生动物检索表，供参考。

原生动物门 Protozoa

原生动物门分纲检索表

- 1 (8) 营养期间以伪足或鞭毛为行动工具
..... 肉鞭亚门 *Sarcomastigophora*
- 2 (5) 营养期间以鞭毛为行动工具..... 鞭毛总纲 *Mastigophora*
- 3 (4) 有绿的色素体，但也有无色的
..... 植鞭纲 *Phytomastigophorea*
- 4 (3) 没有绿的色素体，无例外..... 动鞭纲 *Zoomastigophorea*
- 5 (2) 营养期间以伪足为行动工具..... 肉足总纲 *Sarcodina*
- 6 (7) 伪足叶状，指状或丝状，无轴丝..... 根足纲 *Rhizopodea*
- 7 (6) 伪足呈辐射形，有轴丝..... 辐足纲 *Actinopodea*
- 8 (1) 营养期间以纤毛为行动工具..... 纤毛亚门 *Ciliophora*
纤毛纲 *Ciliata*

(一) 植鞭纲 *Phytomastigophorea*

植鞭纲分种的检索表

- 1 (6) 体形较小，个体本身不超过20微米
..... 金滴目 *Chrysomonadida*
柔滴科 *Ochromonidae*
- 2 (5) 只有一根较长的鞭毛..... 屋滴虫属 *Oikomonas*
- 3 (4) 形成群体，个体后端都尖削
..... 聚屋滴虫 *Oikomonas socialis*
- 4 (3) 个体单独生存，后端不尖削
..... 气球屋滴虫 *Oikomonas termo*

- 5 (2) 有2根鞭毛, 一长一短.....滴虫属 *Monas*
变形滴虫 *Monas amoebina*
- 6 (1) 体形较大, 个体本身皆超过20微米.....眼虫目 *Euglenida*
- 7 (12) 身体多少呈纺锤形, 表膜上满具螺旋状条纹
.....眼虫亚目 *Euglenina*
- 8 (11) 有绿的色素体.....眼虫属 *Euglena*
- 9 (10) 比较宽阔的纺锤形; 色素体呈扁带形
.....绿眼虫 *Euglena viridis*
- 10 (9) 细长针状的纺锤形; 色素体是小的圆盘形
.....针眼虫 *Euglena acus*
- 11 (8) 没有绿的色素体.....漂眼虫属 *Astasia*
尾漂眼虫 *Astasia klebsi*
- 12 (7) 身体不象纺锤形, 表膜上无螺旋状条纹
- 13 (14) 身体变动大, 无一定形状; 鞭毛2根, 长的一根笔直
指向前方.....袋鞭亚目 *Peranematina*
粗袋鞭虫 *Peranema trichophorum*
- 14 (13) 身体极少变动, 有一定形状; 鞭毛1或2根
.....沟滴亚目 *Petalomonadina*
- 15 (18) 鞭毛只有一根, 指向前方
- 16 (17) 扁平的腹面有1或2个纵长凹沟
.....中纵沟滴虫 *Petalomonas mediocanellata*
- 17 (16) 扁平的腹面没有凹沟
.....压缩盾滴虫 *Thylacomonas compressa*
- 18 (15) 鞭毛2根, 长的一根拖在身体后面
- 19 (22) 胞咽长而发达, 腹面沟痕直而不弯
- 20 (21) 细胞核位于中部, 沟痕不只一条
.....沟内管虫 *Entosiphon sulcatum*
- 21 (20) 细胞核位于后半部, 沟痕只有一条
.....葡萄异鞭虫 *Anisonema acinus*
- 22 (19) 看不出有胞咽存在, 腹面沟痕多少弯曲的
.....斜沟鞭虫 *Colponema loxodes*

(二) 动鞭纲 Zoomastigophorea

动鞭毛虫分种检索表

- 1 (8) 两侧不均称, 鞭毛2或1根.....波豆科 Bodinidae
- 2 (7) 鞭毛2根, 前端没有吻状突出
- 3 (6) 鞭毛2根皆从身体前端伸出.....波豆虫属 Bodo
- 4 (5) 呈颠倒的梨形, 后端或多或少尖削
.....尾波豆虫 Bodo caudatus
- 5 (4) 呈卵圆形, 后端浑圆, 前端少许弯转成一尖角
.....梨波豆虫 Bodo edax
- 6 (3) 鞭毛2根皆从身体侧面伸出
.....跳侧滴虫 Pleuromonas jaculans
- 7 (2) 鞭毛1根, 前端有一长的吻状突出
.....鼻吻滴虫 Rhynchomonas nasuta
- 8 (1) 两侧均称, 鞭毛8根, 左右两侧各有一长三短
.....六鞭科 Hexamitidae
活泼锥滴虫 Trepomonas agilis

(三) 根足纲 Rhizopodea

根足纲分科检索表

- 1 (12) 伪足叶状或指状, 即使有分枝, 不会交织在一起
.....叶足亚纲 Lobosia
- 2 (5) 裸体而无壳.....变形目 Amoebida
- 3 (4) 除了有变形期, 还有鞭毛期.....纳旧科 Naegleriidae
- 4 (3) 没有鞭毛期, 只有变形期.....变形科 Amoebidae
- 5 (2) 本体皆有壳围裹.....表壳目 Arcellinida
- 6 (7) 壳很薄而柔软, 口孔无一定形式
.....螺足科 Cochliopodiidae
- 7 (6) 壳坚硬, 有一定的壳孔
- 8 (9) 背腹面观壳呈表壳形.....表壳科 Arcellidae
- 9 (8) 壳不象表壳形
- 10 (11) 壳上混有外来物质, 本体分泌物不会形成鳞或块片。壳孔偏向一侧.....匣壳科 Centropyxidae
- 11 (10) 壳系圆的鳞片或方的薄片所组成, 极少外裹物质。壳孔在

- 末端中央.....梨壳科 *Nebelidae*
- 12 (1) 伪足丝或线状, 分枝多并交织在一起而成网状
.....丝足亚纲 *Filosia*
- 13 (14) 无壳
- 14 (13) 有壳.....网足目 *Gromiida*
- 15 (16) 壳不是由含硅的鳞片所组成
- 16 (15) 壳由含硅的鳞片所组成.....鳞壳科 *Euglyphidae*

在废水生物处理中, 经常有变形科的踪迹。其中以变形虫最多。

变形科分种检索表

- 1 (2) 体形都很大, 在自然环境中, 通常在500微米以上。细胞核很多, 一般有100个左右.....多核变形虫属 *Pelomyxa*
绒毛多核变形虫 *Pelomyxa villosa*
- 2 (1) 体形有大有小, 一般在20~500微米之间。细胞核通常只有1个, 最多2个
- 3 (22) 体形较大, 后端往往不是光滑的。伪足明显, 通常不止1个, 行动比较活泼.....变形虫属 *Amoeba*
- 4 (5) 身体大小在200~500微米之间。伪足多, 末端扁而很宽阔
.....无恒变形虫 *Amoeba dubia*
- 5 (4) 身体大小在200微米以下
- 6 (11) 身体大小在50~200微米之间。伪足较多, 末端不甚宽阔
- 7 (10) 伪足基部宽阔, 末端或多或少尖削
- 8 (9) 内质有很多空的泡沫。伪足只从前端伸出
.....沫状变形虫 *Amoeba spumosa*
- 9 (8) 内质没有空的泡沫。周围都能有伪足伸出
.....蝙蝠变形虫 *Amoeba vespertilis*
- 10 (7) 伪足指头状, 末端浑圆而不会尖削
.....珊瑚变形虫 *Amoeba gorgonia*
- 11 (6) 体形较小, 在20~50微米之间。伪足较少, 它的末端有不同形式
- 12 (13) 伪足很长而较细, 末端尖削, 从身体周围射出
.....辐射变形虫 *Amoeba radiosa*

- 13 (12) 伪足不是细长的, 也不会身体周围都有
- 14 (15) 伪足有2个以上, 通常呈短的片状或指头状, 内质有不少空的泡沫……………泡状变形虫 *Amoeba alveolata*
- 15 (14) 伪足就是宽阔的前端, 一般只有1个, 不会超过2个
- 16 (17) 身体呈纵长的蛞蝓形。伪足偶尔会有2个的
……………蛞蝓变形虫 *Amoeba limax*
- 17 (16) 身体呈卵圆形或圆球形。伪足只有1个, 就是向前扩展宽阔的前端
- 18 (19) 外质表膜上经常会出现3~4条纵长的条纹
……………条纹变形虫 *Amoeba striata*
- 19 (18) 外质表膜上没有纵长的条纹
- 20 (21) 身体呈卵圆形, 前端最阔处就是伪足
……………点滴变形虫 *Amoeba guttula*
- 21 (20) 身体呈圆球形; 向前推进时一部分涌出的外质就是伪足
……………泥生变形虫 *Amoeba limicola*
- 22 (3) 体形很小, 后端光滑, 伪足不明显, 只有1个, 行动迟钝
……………筒变虫属 *Vahlkamp fia*
- 23 (24) 身体呈纵长的蛞蝓形
……………蛞蝓筒变虫 *Vahlkamp fia limax*
- 24 (23) 身体近似圆球形
……………点滴筒变虫 *Vahlkamp fia guttula*

(四) 纤毛纲 Ciliata

亚纲和目的检索表

- 1 (10) 胞口旁没有很发达而向右旋的小膜口缘区
- 2 (7) 绝大多数是自由活动的。体纤毛均匀地分布在全身; 口纤毛组织即使分化, 也只组成几片波动小膜, 不会展成带形
……………全毛亚纲 *Holotricha*
- 3 (4) 由刺杆组成的胞口和胞咽直接通向外面, 无口纤毛组织的分化……………裸口目 *Gymnostomatida*
- 4 (3) 胞口和胞咽不是直接通向外面的
- 5 (6) 胞口前有口前庭存在, 口旁具有通常的纤毛, 但没有组成波动膜或其它小膜……………毛口目 *Trichostomatida*

- 6 (5) 有不同形式的胞口腔位于腹面, 内有口纤毛所组成的波动膜和其它波状小膜……………膜口目 *Hymenostomatida*
- 7 (2) 绝大多数是用柄固着在其它物体上的。基本上没有体纤毛、但有口纤毛; 口纤毛组织有的很发达, 有的不具备
- 8 (9) 固着的种类除了变成游泳体时后端长出一圈纤毛外, 没有其它体纤毛存在。口纤毛组织很发达, 形成三片向左旋的口缘膜区……………缘毛亚纲 *Peritricha*
缘毛目 *Peritrichida*
- 9 (8) 只有“胚体”或“幼体”具有体纤毛, 但没有口纤毛组织。固着的“成体”用吸管代替纤毛摄取食物
……………吸管亚纲 *Suctoriora*
吸管目 *Suctorida*
- 10 (1) 胞口旁具有很发达而向右旋的小膜口缘区
……………旋唇亚纲 *Spirotricha*
- 11 (12) 背腹面一般不是扁平。如有体纤毛存在, 分布很均匀, 不会有刚毛或棘毛存在……………异毛目 *Heterotrichida*
- 12 (11) 背腹面扁平, 背面纤毛减少, 代之以短而细的感觉刚毛; 腹面纤毛有一定的行列, 并形成粗壮的触毛
……………下毛目 *Hypotrichida*
裸口目 *Gymnostomatida*

1. 裂口科 *Amphileptidae*

裂口科的属和种的检索表

- 1 (6) 左侧“躯干”比较平, 不会显著地向外凸出。前端“颈部”右侧具有短而不动的针状刚毛。伸缩泡不一定只有一个, 个别的种类有很多个……………半眉虫属 *Hemiophrys*
- 2 (5) 体形大, 有100~300微米长, 体内有刺丝泡。
- 3 (4) 体长在200~300微米之间。伸缩泡很多, 背腹面各有一行。后端显著地尖削……………肋状半眉虫 *Hemiophrys pleurosigma*
- 4 (3) 体长在130~180微米之间。伸缩泡只有一个, 靠近后端。后端并不显著地尖削
……………纺锤半眉虫 *Hemiophrys fusidens*
- 5 (2) 体形小, 只有35~55微米长, 体内没有刺丝泡……………

-敏捷半眉虫 *Hemiophrys agilis*
- 6 (1) 左侧“躯干”往往显著地向外凸出。前端“颈部”右侧没有短而不动的针状触毛。伸缩泡一般只有一个，不会很多
.....漫游虫属 *Litonotus*
- 7 (8) 背面左侧有一纵长的龙骨状凸出
.....龙骨漫游虫 *Litonotus carinatus*
- 8 (7) 背面没有纵长的龙骨状凸出
- 9 (10) 后端尖削扁平而形成一“尾部”，沿着胞口裂缝有刺丝泡存在.....片状漫游虫 *Litonotus fasciola*
- 10 (9) 后端浑圆或钝圆，不会尖削成“尾部”，沿着胞口裂缝没有刺丝泡的存在.....钝漫游虫 *Litonotus obtusus*

2. 肾形科 Colpodidae

肾形虫属分种检索表

- 1 (2) 体长50~120微米。前端左缘有8~10行齿状缺刻。口前庭没有一束长的须状纤毛。大核核质呈星状
.....僧帽肾形虫 *Colpoda cucullus*
- 2 (1) 体长32~48微米。前端左缘有5~6行齿状缺刻。口前庭具有一束长的须状纤毛。大核核质不呈星状
.....隆额肾形虫 *Colpoda steini*

3. 四膜科 Tetrahymenidae

四膜科分种检索表

- 1 (2) 呈不对称的卵圆形或豆形。前端向腹面弯转。胞口上面的缝合线中部往往向右弯曲.....豆形虫属 *Colpidium*
弯豆形虫 *Colpidium campylum*
- 2 (1) 呈对称的梨形。前端不向腹面弯转。胞口上面的缝合线笔直而无弯曲.....四膜虫属 *Tetrahymena*
梨形四膜虫 *Tetrahymena pyriformis*

4. 草履科 Parameciidae

草履科分种检索表

- 1 (6) 形似一支雪茄，背腹面浑圆后端或多或少尖削

- 2 (3) 体长一般在120~180微米之间。后端虽也细削，但比较钝，没有象其它两种那样尖削。有二个小核
.....双核草履虫 *Paramecium aurelia*
- 3 (2) 体长一般在180~330微米之间，后端比较明显地尖削
- 4 (5) 伸缩泡只有正常的2个。小核只有1个。体长在180~300微米之间.....尾草履虫 *Paramecium caudatum*
- 5 (4) 伸缩泡有3至7个。小核有4个或4个以上。体长在190~330微米之间...多核草履虫 *Paramecium multimicronucleatum*
- 6 (1) 不象一支雪茄，背腹面少许压扁而宽阔。后端浑圆
- 7 (8) 体内没有共生绿藻的存在
- 8 (7) 体内有共生绿藻的存在.....绿草履虫 *Paramecium bursaria*

5. 钟形科 Vorticellidae

钟形科分属检索表

- 1 (4) 柄是分枝的，形成群体
- 2 (3) 柄内肌丝轴鞘只伸展到分枝基部为止，每一支柄只能单独伸缩.....独缩虫属 *Carchesium*
- 3 (2) 所有支柄肌丝轴鞘都和主柄肌丝轴鞘连接在一起，并不中断，群体的所有分枝都能同时伸缩
.....聚缩虫属 *Zoothamnium*
- 4 (1) 柄没有分枝，都是单独的个体.....钟虫属 *Vorticella*

(1) 钟虫属 *Vorticella*

钟虫属分种检索表

- 1 (6) 本体呈长圆锥形
- 2 (5) 体形大，长度在55微米以上；体长为体宽的2.5~3倍。本体不会经常高度地弯向一侧
- 3 (4) 表膜上横纹很明显，后端或下半部没有斜行环带状的隆起
.....扩张钟虫 *Vorticella extensa*
- 4 (3) 表膜上看不出有横纹，后端或下半部具有一斜行环带状的隆起.....法帽钟虫 *Vorticella fromenteli*
- 5 (2) 体形小，长度不超过50微米，体长不超过体宽的2.5倍。本体经常向一侧高度地弯转.....弯钟虫 *Vorticella hamata*
- 6 (1) 本体不是长圆锥形而是其它形式

- 7 (10) 本体一般呈长筒形
- 8 (9) 收缩时柄只有中部盘绕在一起而形成几个圈环
.....长钟虫 *Vorticella elongata*
- 9 (8) 收缩时柄全部收缩而都盘绕在一起。尖削的后端有明显的
褶皱, 形成杯状.....领钟虫 *Vorticella aequilata*
- 10 (7) 本体不是长筒形
- 11 (22) 本体往往中间膨大而呈长椭圆或长卵圆形至近似圆状
- 12 (17) 呈长椭圆形或长卵圆形
- 13 (16) 体形较大, 55~98微米长, 后端与柄连接处没有关节状的
组片。呈长椭圆形
- 14 (15) 表膜上具有明显的横纹。内质呈乳白色, 不很透明
.....污钟虫 *Vorticella putrina*
- 15 (14) 表膜上看不出有横纹, 内质显著地无色而透明
.....白钟虫 *Vorticella alba*
- 16 (13) 体形较小, 16~38微米长, 后端与柄连接处具有一关节状
的组片(帚胚), 呈长卵圆形; 柄往往略呈波浪式的扭曲
.....八钟虫 *Vorticella octava*
- 17 (12) 本体近似圆形
- 18 (19) 本体后端瘦削而形成一“杯托”
.....杯钟虫 *Vorticella cupifera*
- 19 (18) 本体细削的后端不会形成“杯托”
- 20 (21) 体宽为22~48微米, 口围直径为12~25微米, 口围显著地
较小。横纹不十分明显
.....小口钟虫 *Vorticella microstoma*
- 21 (20) 体宽为18~35微米, 口围直径为14~30微米, 口围显著地
较大。横纹很清楚.....条纹钟虫 *Vorticella striata*
- 22 (11) 本体近似钟虫
- 23 (26) 体形较大, 表膜上有细致的横纹, 但没有任何圆粒凸起
- 24 (25) 呈比较细长的钟形, 长度显著地超过宽度。食泡系卵圆形,
往往略带黄色.....沟钟虫 *Vorticella convallaria*
- 25 (24) 呈比较宽阔的钟形, 长度只少许超过宽度。食泡系纺锤形,
通常无色而透明.....似钟虫 *Vorticella similis*
- 26 (23) 体形较小, 呈较长的钟形, 长度不超过体宽两倍。表膜上

靠近前端2/3的部分具有微小的圆粒凸起，靠近后端1/3的部分没有圆粒而有明显的横纹

.....春钟虫 *Vorticella vernalis*

6. 累枝科 Epistylidae

累枝科分属检索表

- 1 (4) 柄分枝而形成群体
- 2 (3) 个体前端口围边缘和钟形科一样，或多或少膨大而成“缘唇”.....累枝虫属 *Epistylis*
- 3 (2) 个体前端口围边缘不膨大，同下面一样平直，没有截然区分的“缘唇”.....盖虫属 *Opercularia*
- 4 (1) 柄不分枝，个体营单独生活
- 5 (8) 本体口缘膨大而形成“缘唇”
- 6 (7) 柄比较短.....短柱虫属 *Rhabdostyla*
- 7 (6) 柄比较长.....后柱虫属 *Opisthostyla*
- 8 (5) 本体口缘不膨大，同下面一样平直，没有截然区分的“缘唇”.....盖果虫属 *Pyxidiella*

(1) 累枝虫属 *Epistylis*

累枝虫属分种检索表

- 1 (2) 本体一般呈圆筒形；较小，长度不超过70微米。分枝有几种不同形式.....湖累枝虫 *Epistylis lacustris*
- 2 (1) 本体不象圆筒形；较大，长度一般均在70微米以上。分枝只有一种形式
- 3 (4) 本体呈瓶形或瓮形。口围“缘唇”显著地厚而膨大；口围盘也比较厚而高度隆起.....瓶累枝虫 *Epistylis urceolata*
- 4 (3) 本体呈漏斗状。口围“缘唇”一般，不会膨大得很厚；口围盘也不会很厚而高度隆起
- 5 (6) 个体往往向侧面作90°的弯转。基柄或主柄非常短。唯一浮游种类.....浮游累枝虫 *Epistylis rotans*
- 6 (5) 个体不会经常向侧面作90°的弯转。基柄或主柄比枝柄要长。都是固着的种类
- 7 (8) 个体收缩时，后半部不会完全形成褶痕。柄比较短而粗壮，

上面除了纵长条纹外还有关节状的双重横纹

.....节累枝虫 *Epistylis articulata*

- 8 (7) 个体收缩时后半部形成若干横的褶痕。柄比较长而光滑，不会出现双重关节状的横纹

.....褶累枝虫 *Epistylis plicatilis*

(2) 盖虫属 *Opercularia*

盖虫属分种检索表

- 1 (6) 本体呈梨形、卵圆形或较短的纺锤形，体长往往不到体宽的2.5倍
- 2 (3) 本体很小，不超过40微米长，表膜上具有细而密的横纹。柄短；群体小，只有2~4个个体
.....小盖虫 *Opercularia minima*
- 3 (2) 本体较大，长度为45~105微米，表膜上看不出有横纹存在。柄比较长；群体要大一些，一般有8~16个个体
- 4 (5) 本体45~56微米长，呈梨形或卵圆形。口围盘比较小。柄相当柔弱而光滑.....集盖虫 *Opercularia coarctata*
- 5 (4) 本体80~105微米长，呈卵圆形或短的纺锤形。口围盘比较大。柄相当粗，具有距离较宽的竹节状横纹
.....节盖虫 *Opercularia articulata*
- 6 (1) 本体纵长，呈长圆筒形、长桶形或长纺锤形。体长为体宽的2.5至5倍
- 7 (10) 本体呈长桶形或长纺锤形，体长在体宽的2.5至3倍之间
- 8 (9) 本体呈长桶形。口围盘非常小，只有体宽的1/6至1/5。本体在枝柄顶上虽能伸缩，但不会作90°的横卧或甚至倒悬在下面.....微盘盖虫 *Opercularia microdiscum*
- 9 (8) 本体呈长纺锤形。口围盘相当大，仅略小于口围。本体在枝柄顶上很活跃，有伸得笔直的，有作90°横卧的，也有倒挂在下面的.....果盖虫 *Opercularia berberina*
- 10 (7) 本体呈长圆筒形，体长为体宽的3倍或5倍
- 11 (18) 体长为体宽的3倍
- 12 (15) 通常中部膨大而呈纵长的纺锤形，群体一般有八个或八个以上个体

- 13 (14) 体形较小, 46~65微米长。柄分枝无一定型式。群体较大
.....圆筒盖虫 *Opercularia cylindrata*
- 14 (13) 体形较大, 70~132微米长。柄分枝为双叉型。群体较小,
一般2~8个个体.....彩盖虫 *Opercularia phryganeae*
- 15 (12) 呈宽阔的圆筒形。群体小, 很少超过4~5个个体
- 16 (17) 柄粗而极短, 但分枝明显.....珊状盖虫 *Opercularia penardi*
- 17 (16) 柄柔弱而略长, 分枝不明显, 只形成少数“节瘤”状很短
的凸出, 个体即着生在上面
.....曲柄盖虫 *Opercularia curvicaula*
- 18 (11) 体长为体宽的5倍, 特别细长
.....长盖虫 *Opercularia elongata*

7. 楯纤科 Aspidiscidae

楯纤虫属 *Aspidisca*

楯纤虫属分种检索表

- 1 (2) 背面光滑, 没有任何纵长的肋条
.....锐利楯纤虫 *Aspidisca lynceus*
- 2 (1) 背面具有纵长的肋条
- 3 (4) 背面具有6条纵长隆起的肋。体形较小, 长度为25~40微
米.....有肋楯纤虫 *Aspidisca costata*
- 4 (3) 背面具有3条纵长隆起的肋。体形较大, 长度为35~55微米
.....凹缝楯纤虫 *Aspidisca sulcata*

附录四 防污绿化植物查对表

(一) 常见的环境保护树种

树 种	主 要 适 宜 地 区	适 应 条 件	环 境 保 护 功 能
槐	华北、西北、东北、华东	喜干冷气候，在碱性土、中性土及酸性土上均能生长，要求土壤深厚、排水良好	抗污染，吸收有害气体
构	黄河流域以南地区	喜光，适应性强，耐干冷和湿润气候，又耐干旱瘠薄和水湿	抗污染，吸收有害气体，防尘，遮荫
梧	长江流域各省、华北、华南、西南	喜光，宜湿润的粘壤土，喜碱性土壤，较不耐水湿	抗污染，吸收有害气体，防尘，遮荫
毛白杨	华北平原	喜湿润，土壤深厚	抗污染，吸收有害气体，防尘
加拿大白杨	华北平原、华中平原	喜湿润，耐瘠薄，耐涝，稍耐碱	吸收有害气体，防风
钻天杨	西北、华北	喜湿润，不耐炎热气候	吸收有害气体，防风
旱柳	东北、华北、华中、西北	耐寒，耐干旱，耐水湿，适应各种性质土壤	吸收有害气体，固砂
垂柳	长江流域、华北、云南省	耐水湿，喜湿润土地或碱性土壤	吸收有害气体
榆	华北、华中、长江以南	耐干冷气候，喜碱性土壤，耐瘠薄干旱，耐轻度盐碱，但不耐水湿	抗污染
桦	长江流域	喜温暖气候和湿润肥沃的土壤，在碱性土壤上生长较好，不怕水湿	抗污染
朴	淮河流域以南	宜排水良好的肥沃、湿润、深厚土壤	抗污染

树 种	主 要 适 宜 地 区	通 应 条 件	环 境 保 护 功 能
泡桐	华北、西北、东北、河南省、山东省	喜碱性、湿润、肥沃的砂质壤土，耐旱、不耐水湿	抗污染，吸收有害气体，防尘，遮荫
银杏	华北、华中、华东、四川省、云南省	耐寒，在酸性土壤、碱性土壤、中性土壤均能生长，不耐水湿	吸收有害气体，杀菌，防火
臭椿	华中、长江以南、华北、四川省	耐寒，喜碱性土壤，很耐旱、瘠薄，怕水湿，耐盐碱	抗污染，吸收有害气体，杀菌
合欢	华北、华中、长江以南、四川省	耐干燥气候，耐砂质土壤	较抗污染，吸收有害气体
楸树	华北、华中、长江以南、四川省	耐寒，喜碱性、肥沃土壤，耐旱	抗污染，防尘
悬铃木	华中、长江以南、四川、华北南部	耐寒性中等，喜湿润、肥沃的砂质壤土	吸收有害气体，防尘，遮荫，隔声
刺槐	华中、长江以南、西北、华北南部	耐寒，中性或碱性土壤上都能生长，耐干旱、瘠薄、盐碱，怕水湿	抗污染，吸收有害气体，固砂
油松	华北、黄河以北	耐寒，在酸性和中性土壤都能生长，耐干旱、瘠薄	防尘，防风，不抗污染
桧柏	华北、华东、四川省	喜光，幼时耐荫，喜温凉和温暖气候以及湿润土壤	抗污染，吸尘，隔声，杀菌
龙柏	长江流域	喜光，幼时耐荫，喜温凉和温暖气候以及湿润土壤	抗污染，防尘，隔声

树 种	主 要 适 宜 地 区	适 应 条 件	环 境 保 护 功 能
雪 松	华东、华中	稍耐荫，喜温和、凉润气候，要求土层深厚、排水良好的轻粘土壤，不耐水湿，不抗烟气	隔声
樟 树	华南、西南、华中、江西省	稍耐荫，喜温暖、湿润气候，喜酸性、湿润、肥沃、排水良好的土壤，不耐干旱、瘠薄	抗污染，吸收有害气体，杀菌、遮荫
广 兰	长江流域以南各省	较耐寒，喜温暖、湿润气候和肥沃土壤	抗污染，吸收有害气体，遮荫
大 叶 黄 杨	长江流域各省	较耐寒，耐荫，喜肥沃、湿润土壤	抗污染，吸收有害气体
女 贞	华东、华中、华南、西南	喜温暖气候，稍耐荫，适生于肥沃、湿润的酸性土，不耐干燥瘠薄	抗污染，吸收有害气体，隔声
海 桐	广东、福建、浙江、江苏省	喜温暖气候，耐荫，喜肥沃、湿润土壤，但耐干旱瘠薄砂地	抗污染，吸收有害气体，隔声
珊 瑚 树	华南、华东、西南	较耐荫，喜湿润肥沃土壤，不耐干旱瘠薄	抗污染，吸收有害气体，隔声防火
夹 竹 桃	长江以南	喜温暖湿润气候，不耐寒	抗污染，吸收有害气体，杀菌
棕 榈	秦岭、长江流域以南	喜温暖气候及肥沃、湿润、排水良好的碱性、中性或微酸性土壤	抗污染
榕 树	华南、福建省、台湾省	喜温暖、多雨气候，酸性土壤	抗污染，吸收有害气体，遮荫
台 湾 相思 树	华南、台湾省	不耐寒，喜中性土壤，耐干旱、瘠薄	抗污染
桉 树	华南、西南	不耐寒，喜湿润、多雨气候和酸性、疏松、湿润的土壤	抗污染，吸收有害气体，杀菌

树种	主要适宜地区	适应条件	环境保护功能
银桦	华南、江西、福建、云南、台湾等省	喜温暖、湿润气候和酸性土壤	较抗污染，吸收有害气体
凤凰木	华南、台湾省、云南省	喜温暖气候和肥沃土壤，不抗烟气	遮荫，隔声，防尘
石栗	华南、福建、云南、江西、湖南等省的南部	喜光，喜肥沃、深厚土壤，宜平地生长	较抗污染，遮荫

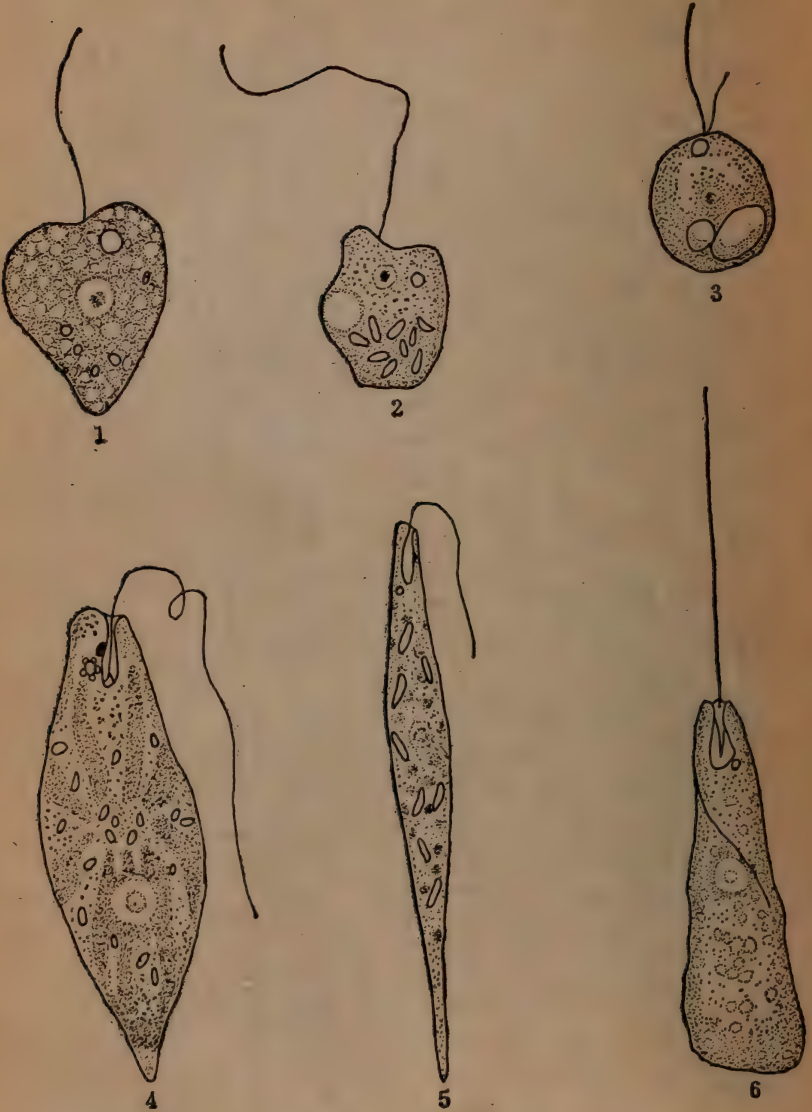
(二) 我国各地主要绿化树种对有害气体 (以 SO_2 为主) 的抗性

地区	抗性	性强	抗性中等	抗性弱
上海地区	珊瑚树、大叶黄杨、女贞、广玉兰、夹竹桃、八角金盘、樟树、小叶女贞、棕榈、臭椿、朴树、丝棉木、榆树、合欢、榔榆、无花果、乌桕、构树、槐树、刺槐、白蜡、木芙蓉、石榴、凤尾兰		侧柏、黑松、罗汉松、垂柳、梧桐、悬铃木、楝树、枫杨、白杨、桑树、榉树、紫玉兰、木槿、月季、紫薇、枣树、柿树	雪松、桂花、厚壳、鸡爪槭、三角枫、重阳木、雪柳、紫荆、腊梅、桃树、梅树
江苏地区	夹竹桃、蚊母、枳壳、女贞、小叶女贞、大叶黄杨、珊瑚树、棕榈、广玉兰、青冈栎、大叶冬青、石楠、石砾、绵槲、飞蛾槭、油橄榄、构树、无花果、		罗汉松、龙柏、铅笔柏、杉木、桂花、樟树、瓜子黄杨、构骨、梧桐、泡桐、臭椿、丝棉木、楝树、槐树、刺槐、合欢、朴树、梓树、麻栎、板栗、黄连木、白玉兰、	雪松、马尾松、黑松、湿地松、加拿大白杨、健杨、垂柳、枫杨、挪威槭、檫树、粗叶树、粗榧、杜仲、红枫、薄壳山核桃、葡萄、水杉

地 区	抗 性 强	抗 性 中 等	抗 性 弱
江 苏 地 区	海桐、凤尾兰	木槿、三角枫、榆树、君迁子	
杭 州 地 区	大叶黄杨、山茶、罗汉松、棕榈、金桔、梔子、珊瑚树、女贞、胡颓子、夹竹桃、瓜子黄杨、樟树、海桐、栒子、臭椿	龙柏、千头柏、乌桕、榉树、水蜡、垂柳、梓树、加拿大白杨、泡桐、无患子、桑树、蔷薇、月季	雪松、桧树、侧柏、榉树、合欢、重阳木、腊梅、紫薇、紫荆、海棠、梅树、櫻树
华中地区 (武汉)	积壳、樟树、女贞、棕桐、夹竹桃、大叶黄杨、栒子、海桐	榉树、桑树、侧柏、臭椿、槐树、刺槐	马尾松、池柏、水杉、桃树、梅树、枫杨
广 东 地 区	对叶榕、印度榕、高山榕、大麻黄、台湾相思、构树、黄槿、油茶、蒲桃	石栗、黄葛榕、竹类、夹竹桃、樟树、阴香、黄槐	马尾松、白千层、白兰、刺桐、凤凰木、荔枝、龙眼、橄榄、杨梅、木瓜
四 川 地 区 (华莹山天池硫磺附近)	尖叶灰木、全缘叶灰木、枹木、四川枹木、羊春条、白常山、冬青、山茶、小叶山茶、茶藨、竹叶椒、胡颓子、映山红、野桐、瑞香、榉枹、朴树、光叶桦	钓樟、黄樟、三条筋、全苞石枹、绵槠、楠木、润楠、光叶海桐、十大功劳、杨桐、小蜡、大叶荚蒾	淡竹、刺黑竹、漆树、油桐、李树
云 南 地 区 (昆明)	女贞、垂柳、刺槐、紫薇、迎春、夹竹桃、棕桐、臭椿、木槿	银桦、赤桉、兰桉、大叶桉、滇柏、龙柏、滇杨	杉木、白兰花、柠檬桉、雪松、悬铃木

地 区	抗 性 强	抗 性 中 等	抗 性 弱
西 安 地 区	大叶黄杨、女贞、构树、棕榈、夹竹桃、刺槐、合欢、石榴、桤柳	白蜡、悬铃木、苦楝、槐树、黄连木、胡颓子、毛白杨	油松、华山松、杜仲、棠梨、苹果、花椒
兰 州 地 区	大叶黄杨、臭椿、槐树、白蜡、栎树、桂香柳、桤柳	桧柏、钻天杨、榆树、泡桐、梨树、桃树	侧柏、梓树、青杨、龙爪柳、杏树、苹果
东 北 地 区	银杏、银白杨、桧柏、臭椿、山皂角、皂角、槐树、紫椴、毛赤杨、刺槐、榆树、桑树、美国白蜡、桤柳、桂香柳、华北卫矛、紫穗槐	侧柏、黄檗、梓树、柞树、栎树、五角枫、泡桐、枫杨、板栗、丁香、茶条槭、樟子松	油松、钻天杨、核桃、苹果、红松、辽东冷杉、白丁香、山丁子、绣线菊、榆叶梅、青杆
华 北 地 区 (北京市)	华山松、桧柏、侧柏、加拿大白杨、刺槐、槐树、榆树、构树、紫穗槐、紫藤	白皮松、毛白杨、核桃、桑树、丝棉木、西府海棠、榆叶梅	油松、云杉、山杏、紫薇、河北杨、钻天杨、水杉

附录五 废水生物处理中常见的原生动物图





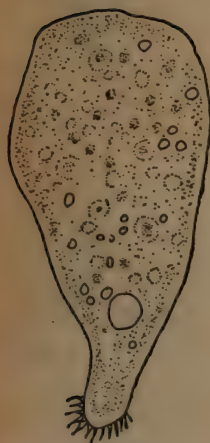
7



8



9



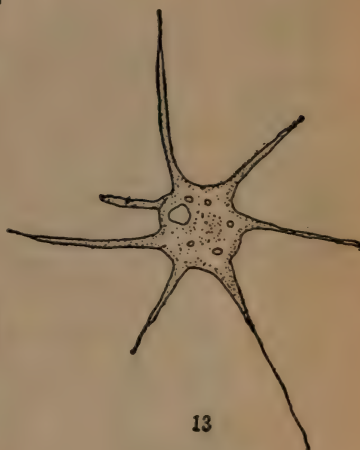
10



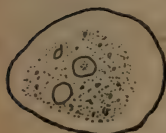
11



12



13



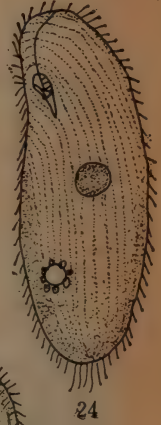
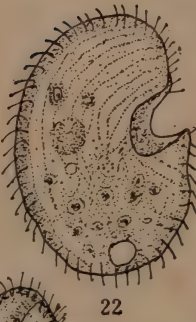
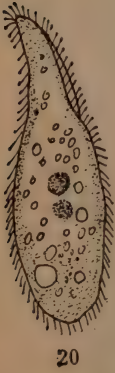
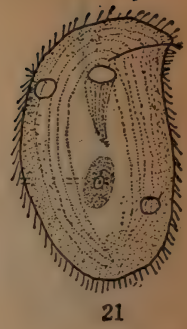
14



15



16





28



29



30



31



32



33



b



34

a



a



b

35



c



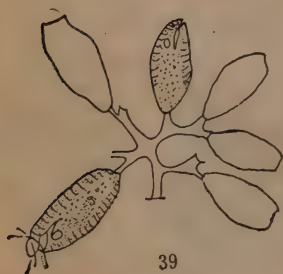
36



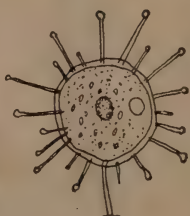
37



38



39



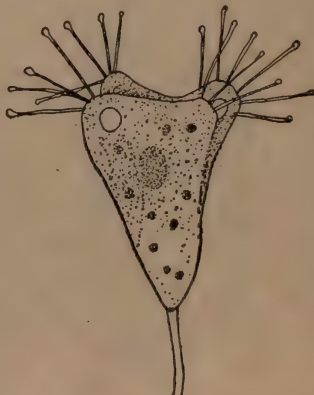
41



43



40



42



44

附录五

- 1—聚星滴虫(*Oikomonas socialis*);
- 2—气球星滴虫(*Oikomonastermo*);
- 3—变形滴虫(*Monas amoebina*);
- 4—绿眼虫(*Euglenaviridis*);
- 5—针眼虫(*Euglena acus*);
- 6—粗袋鞭虫(*Peranematrixophor*um);
- 7—沟内管虫(*Entosiphon sulcatum*);
- 8—尾波豆形虫(*Bodo caudatus*);
- 9—梨波豆形虫(*Bodo edax*);
- 10—绒毛多核变形虫(*Pelomyxa villosa*);
- 11—泡状变形虫(*Amoeba alveolata*);
- 12—蛞蝓变形虫(*Amoeba limax*);
- 13—辐射变形虫(*Amoeba radiosa*);
- 14—点滴筒变虫(*Vahlkampfia guttula*);
- 15—蛞蝓筒变虫(*Vahlkampfia limax*抱囊期);
- 16—普通表壳虫(*Arcella vulgaris*);
- 17—卑怯管叶虫(*Trachelophyllum pusillum*);
- 18—龙骨漫游虫(*Litonotus carinatus*);
- 19—片状漫游虫(*Litonotus fasciola*);
- 20—钝漫游虫(*Litonotus obtusus*);
- 21—钩刺斜管虫(*Chilodonella uncinata*);
- 22—僧帽肾形虫(*Colpoda cucullus*);
- 23—梨形四膜虫(*Tetrahymena pyriformis*);
- 24—弯豆形虫(*Colpidium campyllum*);
- 25—多核草履虫(*Paramecium mu-*

附图

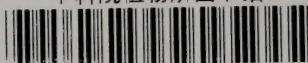
- ltimicronucleatum*);
- 26—绿草履虫(*Paramecium bursaria*);
- 27—尾草履虫(*Paramecium caudatum*);
- 28—螭状独缩虫(*Carchesium polyinum*);
- 29—树状聚缩虫(*Zoothamnium arbuscula*);
- 30—法帽钟虫(*Vorticella fromenteli*);
- 31—领钟虫(*Vorticella aequilata*);
- 32—白钟虫(*Vorticella alba*);
- 33—八钟虫(*Vorticella octava*);
- 34—小口钟虫(*Vorticella microstoma*);
- a—伸展状态, b—游泳体
- 35—沟钟虫(*Vorticella convallaria*);
- a, b—伸展时不同状态, c—游泳体
- 36—瓶累枝虫(*Epistylis urceolata*);
- 37—节累枝虫(*Epistylis articulata*);
- 38—集盖虫(*Opercularia coarctata*);
- a—分枝及个体伸缩状态, b—游泳体
- 39—圆筒盖虫(*Opercularia cylindrata*);
- 40—彩盖虫(*Opercularia phryganee*);
- 41—胶衣足吸管虫(*Podophrya mapasi*);
- 42—四分锤吸管虫(*Tokophrya quadripatita*);
- 43—伪尖毛虫(*Oxytricha fallax*);
- 44—粘游仆虫(*Euplotes muscicola*);

主要参考文献

- [1] 云南大学生物系生态地植物组编著：植物生态与植物群落基本知识，科学出版社，1976年。
- [2] 云南大学生物系编，植物生态学，北京人民教育出版社，1980年。
- [3] 北京大学等选编：植物学基础与植物地理学（第二部分：植物地理学），人民教育出版社，1961年。
- [4] 江苏省植物研究所：城市绿化与环境保护，中国建筑工业出版社，1977年。
- [5] 中国科学院植物研究所二室编著：环境污染与植物，科学出版社，1978年。
- [6] [美] G. E. 赫钦逊等著（华北农业大学植物生理教研组译）：生物圈，科学出版社，1974年。
- [7] 公害与农业编译组编：公害与农业，石油化学工业出版社，1976年。
- [8] 植物生态学译丛，第二集，科学出版社，1975年。
- [9] 王嘉宇等编：水生生物学，农业出版社，1962年。
- [10] 郑重：浮游生物，科学出版社，1957年。
- [11] 辽宁省林业土壤研究所编译：环境污染与生物净化，科学出版社，1976年。
- [12] 工业毒理学编写组编：工业毒理学，上册，上海人民出版社，1976年。
- [13] 湖北省水生生物研究所编辑：环境保护生物监测与治理资料汇编，科学出版社，1978年。
- [14] 顾夏声，李献文编：水处理微生物学基础，中国建筑工业出版社，1980年。
- [15] [日] 高桥俊三等著（张自杰译）：活性污泥生物学，中国建筑工业出版社，1978年。
- [16] 中国科学院微生物研究所细菌分类组编著：一般细菌常用鉴定方法，科学出版社，1978年。
- [17] 湖北省水生生物研究所第四研究室：废水生物处理微型动物图志，中国建筑工业出版社，1976年。
- [18] 南开大学生物系微生物教研室编：基础微生物学，人民教育出版社，1975年。
- [19] 陈华癸：微生物学，农业出版社，1961年。
- [20] 陈华癸主编：微生物学实验，农业出版社，1962年。
- [21] 郑集编著：普通生物化学（下册），人民教育出版社，1980年。
- [22] 小久保清治著（华汝成译）：浮游生物学实验法，人民教育出版社，1960年。
- [23] 袁中一等：固相酶与亲和层析，科学出版社，1975年。
- [24] 王献溥：关于生态系统的概念及其研究的方向，环境保护，6:5, 1978年。
- [25] 中国科学院植物研究所生态室：重金属对生态系统的影响，环境科学，3:64, 1979年。

- [26] 方宗熙: 漫谈遗传工程, 生物学通报, 2:31 1980年.
- [27] 谢淑敏: 近十年国内外微生物生态学进展, 环境科学, 4:56, 1980年.
- [28] 杨惠芳: 遗传工程与环境保护, 环境保护, 1:14, 1979年.
- [29] 郭祥光: 生态学研究的新领域——生态系统, 国外科学, 第一集, 91, 1979年.
- [30] H. E. Hesketh: Understanding & Controlling Air Pollution, Ann. Arbor-Science Publishers, Inc. 1972.
- [31] G. M. Masters: Introduction to Environmental Science and Technology, John Wiley & Sons, Inc. 1974.
- [32] M. J. Hammer: Water and Waste-water Technology, John Wiley & Sons, Inc. 1975.
- [33] Pike E. B., et al.: Recent developments in the study of bacteria in the activated Sludge Process., water poll. control., 71:583, 1972.
- [34] Smith, P. H., Developments in Industrial Microbiology, 7:156, 1966.
- [35] J. E. Zajic: water Pollution Disposal and Reuse, Vol.1, Marcel Dekker, Inc., 1971.
- [36] T. H. Y. Tebbutt: Principles of Water Quality Control, Pergamon Press, 1977.
- [37] Dugan: Biochemical Ecology of Water Pollution, Plenum Press, 1972.
- [38] R. S. Wolfe: Microbial Formation of Methane, Advances in Microbial Physiology, Vol. 6:107, 1971.
- [39] Neal, D. Buffalo, et al.: Microbiology, 1976.
- [40] Edwardd, Schkoedeer: Water and Waste Water Treatment, 1977.
- [41] R. P. Canale: Biological Waste Treatment, John Wiley & sons, Inc., 1971.
- [42] Jeris, J. S., et al.: The Biochemistry of Methane Fermentation vsing ^{14}C Tracers, J. wat. Pollut. Control. Fed., 37:178. 1963.
- [43] D. F. Toerien, et al.: Microbiology of Anaerobic Digestion, Water Research, 3(6): 386, 1969.
- [44] Curds, C. R., et al.: Water Research, 4(3): 225, 1970.
- [45] Caivms, J. Jr., et al.: Biological Montioring of water and Effluent Quality, ASTM Special Tech. Publication, 607, 1977.
- [46] K. Furukaw et al., Agr. Biol. Chem., 17:181, 1971.
- [47] Wheelis, M. L.: Ann. Rev. Microbiol., 29:505, 1975.
- [48] Chakraborty, A.M.: Nature, 271 (5649): 121, 1978.
- [49] 津田松苗, 森下郁子: 生物による水质調査法, 山海堂, 1974.
- [50] 滝口洋: 水处理技术, 19(11), 1978.
- [51] 滝口洋: 水处理技术, 19 (12), 1978.
- [52] Seinosuke Ueda, et al.: J. Gen. Appl. Microbil., 18:239, 1972.
- [53] Akinorikato, et al.: J. Gen. Appl. Microbiol., 17: 439, 1971.
- [54] F. Kucnerowicz, et al.: J. Chem. Tech. Biotechnol., 29(11):707, 1979.

中科院植物所图书馆



S0017471

收到期

83年2月

来源

30.80元 (17车)

书价

1.15元

单

58.181

588

012317

开票日期

环境保护生物学

借者单位

借者姓名

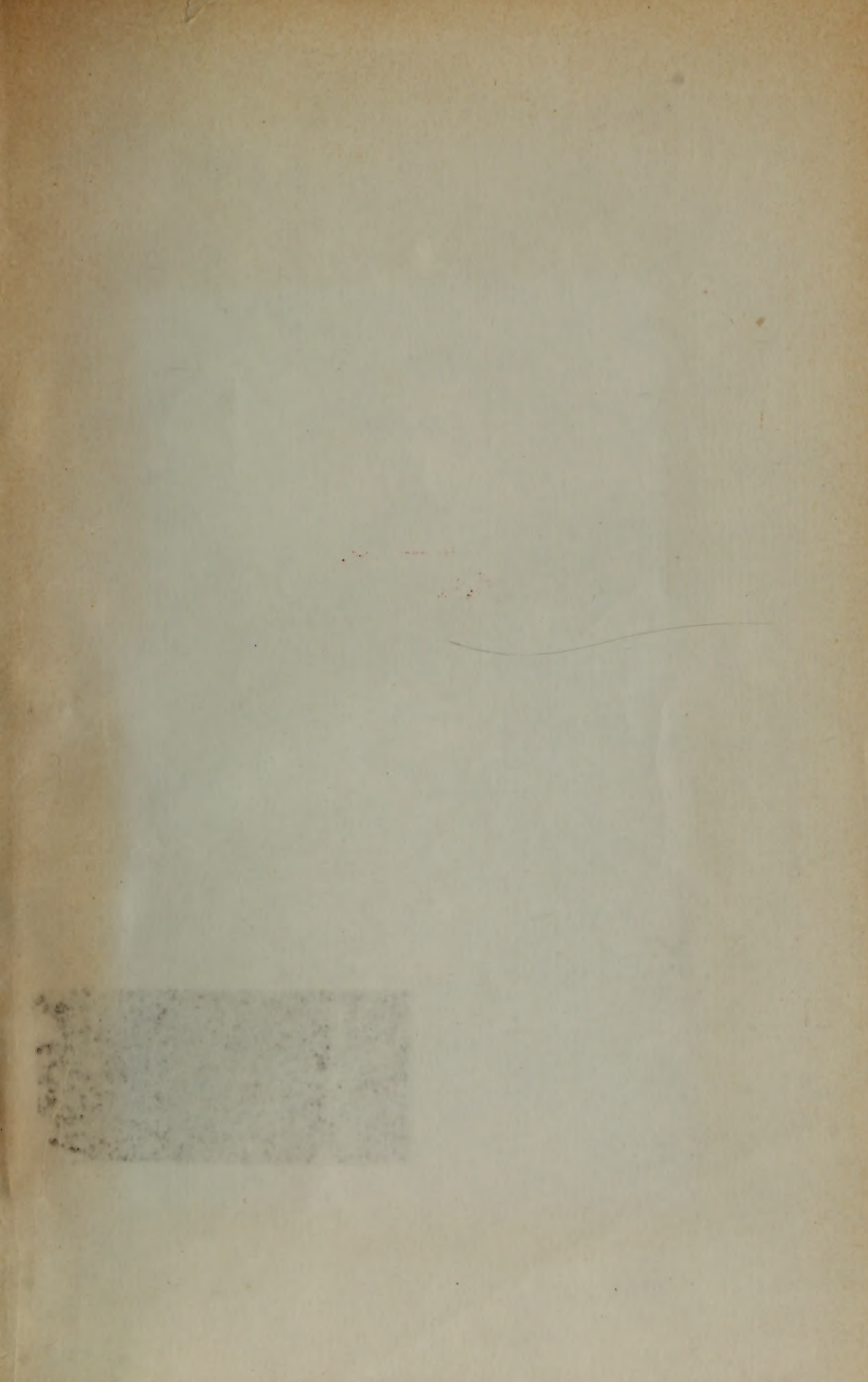
借出日期

还书日期

朱成海

83.2.26

012317



封面设计：关铁林

科技新书目： 31—231

统一书号： 15062·3890

定 价： 1.15 元